

**CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA**  
**PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACION**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**

**EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE UN DISEÑO DE VIAS DE TRANSPORTE  
MENOR ASISTIDO POR COMPUTADORA PARA EL APROVECHAMIENTO  
SELECTIVO DE GUACIMO (*Goethalsia meiantha*) EN UN BOSQUE  
HUMEDO TROPICAL DE TIERRAS BAJAS UBICADO EN  
SARAPIQUI, COSTA RICA**

**POR**

**GERMAN DE JESUS OBANDO VARGAS**



Turrialba, Costa Rica

1997

**CENTRO AGRONOMO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA  
PROGRAMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
MANEJO Y SILVICULTURA DE BOSQUES**

**EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE UN DISEÑO DE VIAS DE TRANSPORTE MENOR ASISTIDO POR COMPUTADORA PARA EL APROVECHAMIENTO SELECTIVO DE GUACIMO (GOETHALSIA MEIANTHA) EN UN BOSQUE HUMEDO TROPICAL DE TIERRAS BAJAS UBICADO EN SARAPIQUI, COSTA RICA**



Tesis sometida a consideración del Comité Técnico Académico del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, para optar por el grado de

***Magister Scientiae***

por

**GERMAN de JESUS OBANDO VARGAS**

Turrialba, Costa Rica  
1997

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Jefatura del Area de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del CATIE y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

*MAGISTER SCIENTIAE*

FIRMANTES:

Sergio Velásquez, MSc.  
Profesor Consejero

Bas T. Louman, MSc.  
Miembro Comité Asesor

Dr. Juan Aguirre  
Miembro Comité Asesor

Dr. Juan Aguirre  
Jefe, Area de Postgrado

Director, Programa de Enseñanza

German Obando  
Candidato

## DEDICATORIA

*A la memoria de mi hijo  
Ariel*

*A mis padres  
Omar y Virginia*

*A mi esposa e hija  
Grettel y Mariel*

*A mis hermanos  
Viviana, Marlice,  
Hellen y Gerardo*

## **AGRADECIMIENTO**

Deseo expresar mi agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta investigación, en especial al Director de Operaciones Gustavo Solano Garro MBA y al Lic. Franz Tattembach Capra Director Ejecutivo de la Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (FUNDECOR) por el apoyo económico y consideración especial durante la realización de este trabajo.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza por la oportunidad y apoyo económico brindado para que este servidor pudiera capacitarse.

Al distinguido Comité Asesor conformado por los señores Sergio Velázquez MSc, Bastian Louman MSc y Juan Aguirre Ph.D., por sus aportes, apoyo y confianza depositada durante la realización del trabajo de campo y análisis de información.

A mi esposa Grettel Coronado y a mi hija Mariel Obando por su apoyo y sacrificio.

A los Señores Carlos Monge e hijo por su paciencia y cooperación durante la ejecución del trabajo de campo.

A los compañeros de FUNDECOR, Ing. Carlos Porras, Ing. Guillermo Vargas, Ing. Heiner Acevedo, Ing. Pedro González, Ing. Pedro Zúñiga, Ing. Victor Montero porque de uno u otro modo apoyaron este trabajo de investigación.

En general a todas las personas que contribuyeron en la realización de esta tesis.

A todos muchas gracias y que Dios les bendiga.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN. . . . .	vii
SUMMARY. . . . .	viii
LISTA DE CUADROS. . . . .	ix
LISTA DE TABLAS. . . . .	x
LISTA DE FIGURAS Y MAPAS. . . . .	x
INTRODUCCIÓN. . . . .	xii
1. OBJETIVOS. . . . .	1
2. HIPOTESIS. . . . .	1
3. REVISION DE LITERATURA. . . . .	2
3.1 El impacto del aprovechamiento selectivo en la respuesta hidrológica del bosque lluvioso tropical. . . . .	2
3.1.1 El sistema de aprovechamiento. . . . .	6
3.1.2 Condiciones Biofísicas . . . . .	12
3.2 El efecto en la respuesta hidrológica de la cuenca y la pérdida de nutrientes. . . . .	13
3.4 Medidas para mitigar el impacto del aprovechamiento selectivo en la respuesta hidrológica del bosque lluvioso tropical. . . . .	15
3.5 Planificación de caminos de maderero en el aprovechamiento forestal. . . . .	21
3.5.1 Diseño integrado de caminos forestales utilizando Sistemas de Información Geográfica. . . . .	23
3.5.2 Aspectos básicos del método kriging para la interpolación de modelos elevación digital (MED). . . . .	25
4. MATERIALES Y METODOS. . . . .	34
4.1 Descripción del área de estudio. . . . .	34
4.2 Evaluación del diseño de vías de transporte menor asistido por computadora. . . . .	37
4.3 Elaboración del mapa base de aprovechamiento utilizado en el diseño de las vías de transporte menor. . . . .	40

<b>5. RESULTADOS Y DISCUSION.</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>5.1 Características generales del aprovechamiento del guácimo (<i>Goethalsia meiantha</i>)</b> . . . . .	<b>46</b>
5.1.2 Distribución del tiempo durante la jornada de trabajo . . . . .	47
<b>5.2 Pautas a seguir en el diseño de las vías de transporte menor para el aprovechamiento del guácimo</b> . . . . .	<b>50</b>
5.2.1 Pautas a seguir en el arrastre . . . . .	51
5.2.2 Pautas a seguir en la extracción . . . . .	56
<b>5.3 Aplicación del diseño de las vías de transporte menor asistido por computadora</b> . . . . .	<b>60</b>
5.3.1 Corrección del mapa base de aprovechamiento . . . . .	60
5.3.2 Construcción del modelo de elevación digital del bloque 2 . . . . .	64
5.3.2.1 Ajuste del semivariograma experimental . . . . .	64
5.3.2.2 Interpolación del modelo de elevación digital . . . . .	66
5.3.3 Diseño asistido por computadora de las vías de transporte menor . . . . .	68
5.3.3.1 Construcción de la superficie de fricción . . . . .	70
5.3.4 Establecimiento de la propuesta de red en el campo . . . . .	74
<b>5.4 Comparación de los dos niveles de planificación de las vías de transporte menor en el aprovechamiento del guácimo</b> . . . . .	<b>76</b>
5.4.1 Impacto sobre el piso del bosque . . . . .	76
5.4.2 Impacto sobre la productividad de las operaciones arrastre y extracción . . . . .	80
5.5 Comentario general . . . . .	83
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> . . . . .	<b>85</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA</b> . . . . .	<b>87</b>
<b>8. ANEXOS</b> . . . . .	<b>93</b>

OBANDO, G. 1997. Evaluación del desempeño de un diseño de vías de transporte menor asistido por computadora para el aprovechamiento selectivo de guácimo (*Goethalsia meiantha*) en un bosque húmedo tropical de tierras bajas ubicado en Sarapiquí, Costa Rica. Tesis Mag. Sc., Turrialba, Costa Rica, CATIE. 105 p.

Palabras claves: Aprovechamiento, transporte menor, diseño asistido por computadora, sistemas de información geográfica, operadores de distancia, modelos de elevación digital, geoestadística, kriging, *Goethalsia meiantha*.

### RESUMEN

Se comparó el tiempo consumido durante el arrastre y la extracción, la densidad de vías de transporte menor y de extracción establecidas durante el aprovechamiento de guácimo (*Goethalsia meiantha*) en un bloque de 15 ha de bosque tropical (bloque 2) cuyas vías de transporte menor se diseñaron por computadora utilizando el operador de distancia Pathway de Idrisi for Windows 2.002; con los resultados obtenidos con una red diseñada manualmente en un área similar (bloque 1).

No se encontraron diferencias significativas en la densidad de la red vial, sin embargo en el bloque 2 se utilizó una menor cantidad de metros de cable durante la extracción. La media de tiempo consumido durante el arrastre en el bloque 1 fue significativamente mayor ( $4.9 \text{ min} \cdot \text{troza}^{-1}$ ) a la del bloque 2 ( $2.03 \text{ min} \cdot \text{troza}^{-1}$ ).

No se determinó a que variables se atribuyen la diferencia en rendimiento, no obstante dado que el tiempo consumido durante la extracción dependió de la longitud de cable extendida y el hecho de que en el diseño asistido por computadora el uso del mismo fuese significativamente menor, sugieren que este sistema de trazado reduce el tiempo consumido durante la extracción, impactando la misma área de bosque que en el diseño manual.



OBANDO, G. 1997. Performance evaluation of computer-assisted design of a skid trail network for the selective logging of Guacimo (*Goethalsia meiantha*) in a tropical low land forest of Sarapiquí, Costa Rica. Tesis Mag. Sc., Turrialba, Costa Rica, CATIE. 105 p.

Key Words: Logging, skid trails, computer-assisted design, geographic information systems, distance operators, Guácimo (*Goethalsia meiantha*), Costa Rica.

### SUMMARY

Skid trails were designed by computer using a distance operator in a block of 15 hectares of tropical rain forest (block 2). The friction surface was built using a model generated by recording the time consumption of skidding and winching operations in the logging of another 15 ha block (block 1) of Guacimo (*Goethalsia meiantha*), where skid trails were manually designed and a farm tractor was used in the logging operations.

The skid trail densities of block 1 were compared to those of block 2 and no significant difference was found. However, in block 1, the mean amount (meters) of cable used during each skidding operation was significantly bigger ( $4.9 \text{ min} \cdot \log^{-1}$ ) to the mean of block 2 ( $2.03 \text{ min} \cdot \log^{-1}$ ).

It was not possible to determine which variable was the responsible of this difference, however because the time consumed during the winching of a tree depends on the cable length and the fact that in block 2 it was significantly shorter, it suggests that computer assisted design reduces the time required for the skidding operations over an equivalent area using manual design.

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1: Cambios en la producción de agua y respuesta hidrológica de la cuenca después del aprovechamiento selectivo o aclareo parcial del bosque lluvioso tropical de tierras bajas (Traducción libre de Bruijnzeel, 1992) . . . . .	6
Cuadro 2: Características generales de los diferentes tipos de carreteras forestales en montes altos tropicales . . . . .	22
Cuadro 3: Condiciones generales de aprovechamiento de la especie guácimo ( <i>Goethalsia meiantha</i> ) para la fabricación de fósforos, en un bloque de aproximadamente 15 ha de bosque húmedo tropical intervenido, Sarapiquí. Costa Rica. . . . .	47
Cuadro 4: Rendimiento observado durante el aprovechamiento de 41 árboles de guácimo ( <i>Goethalsia meiantha</i> ) en un bosque húmedo tropical intervenido de topografía plana, con una cuadrilla de 2 personas, utilizando un tractor agrícola sencillo. Sarapiquí, Costa Rica. . . . .	50
Cuadro 5: Estadísticas descriptivas de las variables incluidas en el análisis de regresión múltiple realizado para la identificación de variables que afectan el rendimiento en la operación arrastre utilizando un tractor de llantas agrícola sencillo en el aprovechamiento del guácimo ( <i>Goethalsia meiantha</i> ). . . . .	53
Cuadro 6: Resumen de resultados del análisis de regresión múltiple para la operación arrastre (viaje cargado), considerando un juego de 51 observaciones de tiempo consumido por un tractor agrícola sencillo. . . . .	54
Cuadro 7: Estadísticas descriptivas de las variables incluidas en el análisis de regresión múltiple realizado para la identificación de variables que afectan el rendimiento en la operación extracción utilizando un tractor de llantas agrícola sencillo, en el aprovechamiento del guácimo ( <i>Goethalsia meiantha</i> ). . . . .	57
Cuadro 8: Resumen de resultados del análisis de regresión múltiple para la operación extracción, Considerando un juego de 36 observaciones de tiempo consumido por un tractor agrícola sencillo. . . . .	59
Cuadro 9: Error de cierre del levantamiento corregido del bloque 2 del área experimental . . . . .	61
Cuadro 10: Parámetros utilizados en el ajuste de un modelo de elevación digital para el bloque 2 del área de estudio utilizando diferentes técnicas de interpolación . . . . .	67

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Comparación del número de metros lineales de vías de transporte menor por parcela de ¼ de hectárea observados en dos niveles de planificación de la red vtm durante el aprovechamiento de guácimo ( <i>Goethalsia meiantha</i> ), en bosque húmedo tropical. Heredia, Costa Rica. . . . .	77
Tabla 2: Comparación del tiempo consumido por fuste durante el arrastre bajo dos niveles de planificación de las vías de transporte menor en el aprovechamiento de guácimo ( <i>Goethalsia meiantha</i> ), en bosque húmedo tropical. Heredia, Costa Rica. . . . .	81
Tabla 3: Comparación del tiempo consumido por troza durante la extracción bajo dos niveles de planificación de las vías de transporte menor en el aprovechamiento de guácimo ( <i>Goethalsia meiantha</i> ), en bosque húmedo tropical. Heredia, Costa Rica. . . . .	82

## LISTA DE FIGURAS Y MAPAS

Figura 1: Relación entre el área de dosel remanente y la intensidad de corta en aprovechamientos selectivos de bosque tropical bajo diferentes niveles de supervisión y control de las operaciones. . . . .	5
Figura 2 Media anual de concentración de sedimentos en suspensión en el flujo base de tres cuencas, una aprovechada en la forma convencional, otra con operaciones de aprovechamiento controladas y una cuenca testigo, ubicadas en la Reserva Forestal Berembun, Negri Sembilan, Malasia. . . . .	11
Figura 3 Porcentaje de área cubierta de caminos y vías de extracción para tres niveles de planificación y cuidado en la ejecución de las operaciones de aprovechamiento en función de la intensidad de corta en bosques lluviosos tropicales en diferentes partes del mundo. . . . .	11
Figura 4: Ejemplo de un semivariograma . . . . .	30
Mapa 1: Ubicación del sitio de estudio. . . . .	35
Mapa 2: Mapa de tipo de bosque y zonas de protección del recurso hídrico del bloque de bosque natural donde se realizó el estudio. Puerto Viejo de Sarapiquí, Costa Rica. . . . .	36
Mapa 3: Ubicación de los bloques 1 y 2 de aprovechamiento en el área de estudio propiedad de la Familia Starke. . . . .	41
Figura 5 Sistema de carriles de inventario para el levantamiento planimétrico y altimétrico de accidentes topográficos y aspectos relevantes para el trazado de las vías de extracción en un aprovechamiento selectivo del bosque tropical en Sarapiquí, Heredia, Costa Rica. . . . .	43
Figura 6 Diagrama de discriminación de área susceptibles a la erosión y aptas para aprovechamiento según los criterios utilizados por FUNDECOR y la legislación vigente en Costa Rica. . . . .	44
Figura 7 Detalle de un mapa base o de aprovechamiento listo para el trazado de caminos a mano. . . . .	45
Figura 8 Distribución del tiempo total invertido en las operaciones de aprovechamiento forestal hasta la colocación de la madera en el patio de acopio, utilizando un diseño manual de vías de transporte menor. . . . .	49

Figura 9: Curvas de tiempo consumido en el arrastre contra pendiente promedio y longitud de las vtm. . . . .	54
Figura 10: Angulo de extracción y ángulo de caída . . . . .	58
Figura 11: Variación del tiempo consumido durante la extracción con respecto a la longitud de la línea de extracción y al ángulo de caída . . . . .	60
Figura 12: Sobreposición de las poligonales cerradas sobre el levantamiento original del bloque 2 del área experimental. . . . .	63
Figura 13: A y B: Semivariograma anisotrópico de los datos de elevación del bloque 2 en el sitio de estudio. C: Variación del rango del semivariograma en función de la dirección del vector $ h $ . . . . .	65
Figura 14: Modelos de elevación digital interpolados con las técnicas Distancia Inversa, Curva mínima y Ordinary Kriging utilizando los parámetros por omisión de Surfer for Windows y utilizando los parámetros de un semivariograma experimental en Ordinary Kriging. . . . .	69
Figura 15: Ubicación de áreas restringidas para el tránsito de maquinaria agrícola del bloque 2 del área experimental. . . . .	71
Figura 16: Superficie de fricción y propuesta de diseño de vías de transporte menor para el bloque 2 del área experimental. . . . .	73
Figura 17: Red de vías de transporte menor finalmente establecidas en el campo durante el aprovechamiento del guácimo siguiendo la propuesta de diseño construida con el algoritmo Pathway de Idrisi for Windows 2.0. . . . .	75
Figura 18: Red de vías de transporte menor establecidas durante el aprovechamiento del guácimo en dos bloques de aproximadamente 15 ha cada uno. . . . .	78

## INTRODUCCION

Desde el punto de vista ecológico el manejo forestal es una actividad antropogénica que altera el patrón, frecuencia, intensidad y tipo de perturbaciones que mantienen al bosque lluvioso tropical en equilibrio dinámico, con el objetivo de producir bienes y servicios para satisfacer ciertas necesidades del hombre.

Obviamente dicha alteración presenta inconvenientes en cuanto a la conservación y uso sostenible del recurso bosque. Uno de ellos es la sustitución del patrón natural de perturbaciones por un programa de intervenciones silviculturales sistemáticas en el tiempo<sup>1</sup> y el espacio<sup>2</sup>, de intensidad mayor a las producidas en condiciones naturales donde una mayor área del bosque es afectada periódicamente en un corto lapso de tiempo.

Dichas intervenciones producen generalmente dos tipos de microambientes muy diferentes: a) sitios alterados durante la corta o eliminación de árboles vía aprovechamiento o aplicación de tratamientos silvícolas, y b) áreas de caminos y patios de acopio utilizados durante la extracción de los fustes de los árboles cortados

El primer tipo de intervención proporciona temporalmente una mayor disponibilidad de luz para el rodal remanente haciendo más dinámico el bosque e incrementando las tasas de crecimiento (Finegan, 1993; Finegan et al, 1995) y reclutamiento (Espinoza, 1992) hasta que la vegetación afectada regresa a las condiciones pre-intervención. Por otra parte la eliminación de árboles a un nivel moderado durante el aprovechamiento ha probado afectar levemente la diversidad biológica del bosque en áreas menores a 100 ha y manejadas experimentalmente (Delgado, 1995; Finega et al, 1995).

---

<sup>1</sup> Aprovechamiento de árboles cada vez que se cumpla el turno evitando que los árboles llegen a la madurez y que mueran naturalmente; y la aplicación de tratamientos silviculturales en forma programada.

<sup>2</sup> Aprovechamiento y liberación de solamente un grupo de especies comerciales

A pesar de lo anterior persisten serias interrogantes en cuanto a las implicaciones de la alteración del patrón natural de perturbaciones en la conservación de la capacidad productiva y preservación del bosque, aspecto que no fue objeto de estudio en esta investigación.

El segundo tipo de microambiente se considera desde cualquier punto de vista como una perturbación negativa ya que en las áreas de caminos y patios de acopio se presenta la mayor parte de la erosión (Nussbaum et al, 1995) y por consiguiente la mayor pérdida de nutrientes, además de presentar una composición florística muy diferente a la de los hábitats presentes en un bosque no perturbado (Miranda, 1993; Delgado, 1995).

Lo anterior afecta la capacidad productiva y de regeneración de especies comerciales del bosque, ocasionando que estas áreas pasen a ser inadecuadas para la producción de biomasa, dado que a diferencia de las alteraciones anteriores, los caminos y vías de extracción tardan mucho tiempo en recuperarse y retornar al estado de pre-aprovechamiento.

En Surinam, vías de extracción utilizadas ocho años atrás aún permanecían en el mismo estado de compactación y sin signos de recuperación, al menos en cuanto a densidad de suelo y conductividad del agua se refiere (Hendrison, 1990).

En los bosques neotropicales aprovechados en forma convencional el área cubierta por las vías de extracción llega alcanzar hasta un 15% del piso del bosque (Hendrison, 1990). Es por esta razón que la construcción de caminos forestales debe verse como una inversión que a corto plazo es necesaria para recibir los beneficios del bosque pero que a largo plazo significa la pérdida en "n" rotaciones de un porcentaje significativo de la producción del bosque.

Una forma de evitar esta reducción en la capacidad productiva del bosque es utilizando sistemas de aprovechamiento que contemplen una densidad mínima de vías de extracción

tales como cables aéreos o helicópteros (Putz, 1994). Sin embargo las limitantes económicas y tecnológicas del sector forestal en Costa Rica no permiten la utilización de dichos sistemas de extracción.

La alternativa a la situación anterior sería entonces minimizar la densidad de vías de extracción dentro del sistema de aprovechamiento utilizado en Costa Rica (arrastre con tractor de oruga, forestal de llantas y agrícola).

Este aspecto está siendo inculcado en los profesionales forestales del país, sin embargo hasta la fecha no se ha desarrollado una metodología de diseño de vías de extracción objetiva, sino que esta se diseña y establece directamente en el campo con la ayuda de los mapas base de aprovechamiento. Situación que no garantiza que el impacto en vías de extracción sea mínimo, ni que las operaciones se estén realizando de forma óptima.

La presente investigación pone al alcance de los profesionales una propuesta metodológica para el diseño de vías de extracción asistido por computadora. Con dicha propuesta se ha tratado de encontrar un equilibrio entre el control del impacto producido por los caminos y el deterioro del rendimiento de las operaciones de arrastre y extracción causado por la necesidad de tener que practicar medidas de bajo impacto, como lo es el uso del cable en la extracción.

Si bien esta propuesta ha sido diseñada para las condiciones particulares del aprovechamiento del guácimo en terrenos de pendiente y suelo favorable, la metodología con la cual se adaptó el operador de distancia Pathway para el diseño de vías de transporte menor puede ser replicada para otros tipos de maquinaria, equipo, personal y condiciones particulares del sitio.

## **I. OBJETIVOS**

### **I.1 General**

Comparar el desempeño de una red de vías de transporte menor diseñada por computadora, con el de una establecida manualmente, para el aprovechamiento selectivo de la especie guácimo (*Goethalsia meiantha*) en un bosque húmedo tropical de tierras bajas.

### **I.2 Específicos**

- c. Construir una superficie de fricción que simule adecuadamente el peso de las diferentes variables que afectan el rendimiento de la extracción y arrastre de árboles de guácimo, bajo las condiciones particulares de aprovechamiento del sitio de estudio.
- b. Evaluar el ajuste de la técnica Kriging en la interpolación de un modelo de elevación digital útil para el diseño de vías de transporte menor asistido por computadora.
- c. Comparar el tiempo consumido durante la extracción y el arrastre a patio obtenido a partir del establecimiento de ambos diseños de red de vías de transporte menor.
- d. Comparar la densidad de vías transporte menor producidas a partir del establecimiento de ambos diseños.

## **2. HIPOTESIS**

Ho1: El diseño de vías de transporte menor asistido por computadora no afecta la densidad de la red vial.

Ho2: El diseño de vías de transporte menor asistido por computadora no afecta la productividad de las operaciones de extracción y transporte menor.



### 3. REVISION DE LITERATURA.

#### 3.1 El impacto del aprovechamiento selectivo<sup>1</sup> en la respuesta hidrológica del bosque lluvioso tropical

El manejo forestal puede influir en la respuesta hidrológica de una cuenca al alterar en mayor o menor grado la condición y estado de la vegetación de la superficie del suelo, modificación que posteriormente influye sobre su estado de humedad (Stadtmüller, 1994), y por consiguiente sobre la cantidad y distribución del flujo de agua que sale de la cuenca.

Dicha alteración de la vegetación se produce mediante las intervenciones silviculturales cuyo impacto sobre el régimen hídrico está en función de la cantidad de dosel removido (Hamilton y King, 1983; Stadtmüller, 1994), o en bien de la cantidad de biomasa removida (Hamilton y King, 1983) via aprovechamiento de la madera.

Por su parte la cantidad de dosel superior removido durante las operaciones silviculturales está en función de la intensidad de las operaciones y del nivel de planificación y cuidado con que se ejecutan las operaciones.

Jonkers (1987) comprobó para un bosque lluvioso tropical en Surinam, bajo diseño experimental y para un rango de intensidades de corta entre 15 y 46 m<sup>3</sup>\*ha<sup>-1</sup>, que existe una relación lineal e inversa entre la intensidad de corta y la cantidad de dosel remanente en el bosque después del aprovechamiento (Ver figura 1).

Hendrison (1990) en la misma región, evaluó el área producida de claros para dos tratamientos: corta controlada y tala convencional, bajo una misma intensidad de aprovechamiento, comprobando que la cantidad de dosel removido también está afectado por

---

<sup>1</sup> El aprovechamiento selectivo o "selective logging" se define como "la remoción de árboles maduros, sobre maduros, o defectuosos procurando dejar un remanente saludable de individuos y de volumen de especies comerciales que asegure una futura cosecha de madera, además de una cobertura para la conservación y protección del suelo y agua" (Bureau of Forestry Handbook on Selective Logging, 1970 citado por Rapera, 1976). Este término es frecuentemente relacionado con el sistema silvicultural policíclico (polycyclic system).

el método de corta de los árboles. Esto se debe a que durante una tala controlada se restringe el área de claros producidos al evitar derribar innecesariamente árboles huecos o bien árboles que obstaculizan la caída de otro que ha sido cortado, además de que se practica la tala dirigida (Ver figura 1)

La pérdida de dosel protector durante el aprovechamiento implica una reducción en la evapotranspiración (Hamilton y King, 1983), además de permitir que la luz solar alcance una gran fracción del suelo, aún en áreas no expuestas directamente a la pérdida de dosel (Crome et al., 1992); alterando así los regímenes de temperatura y humedad cercanos al piso del bosque (Bruijnzeel, 1992).

Lo anterior no necesariamente implica una reducción en la humedad de los suelos en los claros abiertos, ya que la presencia de una menor área foliar, menor capacidad de intercepción de la lluvia, y los sistemas radiculares menos desarrollados de la regeneración de dichos claros hacen que esta vegetación este menos capacitada para explotar las reservas de humedad del suelo, en comparación con la capacidad de un sistema radicular compuesto por árboles maduros (Bruijnzeel, 1992; Guilmour, 1971).

Por lo tanto durante el período de regeneración de estos claros el almacenaje de humedad en el suelo es mayor (Bruijnzeel, 1992), haciendo más agua disponible al flujo subsuperficial (nivel freático) y manantiales, elevando así el nivel de los pozos, y el caudal de los ríos (Hamilton y King, 1983).

El mayor incremento en el caudal se presenta durante los períodos de bajo flujo, situación que resulta de gran importancia para los manejadores de bosque cuyos mayores problemas se presentan en el recurso agua. Por otra parte durante los períodos de alta precipitación, la magnitud y duración de las descargas pico de los ríos son usualmente (pero no siempre) mayores, pudiendo provocar inundaciones repentinas (Hamilton y King, 1983).

Lo anterior ha sido confirmado en una gran cantidad de investigaciones, sin embargo pocos estudios se han realizado considerando debidamente los efectos de las variaciones que usualmente se presentan en los patrones climáticos de los trópicos antes y después del aprovechamiento, situación que podría haber llevado a algunas de estas investigaciones a conclusiones incorrectas (Bruijnzeel, 1990; 1992).

En la cuadro 1 se presentan los resultados de cuatro experimentos de cuencas en pares de bosques lluviosos de tierras bajas donde se evaluaron los cambios en la producción de agua después de la ejecución de un aprovechamiento selectivo o de la remoción parcial de la cubierta vegetal resumidos por Bruijnzeel (1992).

Dichas investigaciones muestran claramente un incremento en la producción de agua en los casos donde las remociones de dosel protector fue alta, producto de la aplicación de una intensidad de aprovechamiento superior o igual al 40% del volumen comercial; y prácticamente ningún cambio en los flujos pico de los ríos aún en el caso donde un 67% de la cobertura boscosa de la cuenca fue removida. Esto indica que el disturbio ocasionado en el dosel protector durante un aprovechamiento selectivo ocasiona un aumento en la producción de agua.

Lo anterior responde a que el impacto de la disminución del dosel protector sobre el ciclo hidrológico está en función de dos factores: la intensidad de la apertura del dosel y el tiempo que esta tome en recuperarse, o bien el tiempo que tenga efecto el impacto (Stadtmüller, 1994).

Por lo tanto en un aprovechamiento selectivo donde el disturbio del dosel protector por lo general se distribuye espacialmente en forma de mosaico de claros (Crome et al., 1992; Uhl y Guimarães, 1989; Cannon et al., 1994) y que además representa una reducción moderada del área de dosel (entre 4% y 40%), resulta lógico esperar que su efecto en el estado de la humedad de los suelos, y en el flujo de caudal de la cuenca sea significativo (Bruijnzeel, 1992; Stadtmüller, 1994). Además de que su efecto en los procesos de infiltración, escorrentía y

erosión superficial sea nulo (Stadtmüller, 1994), en tanto el suelo en los sitios donde el dosel es eliminado no se altere durante la extracción de los fustes.

Lo anterior coincide con la observación de Stadtmüller (1994), quien señala que para garantizar que el impacto hidrológico sea mínimo la disminución de la cobertura no debe exceder el 30%, ya que a partir de este grado de intervención, la escorrentía y la erosión tienden a aumentar fuertemente.

El citado autor se basa en la revisión de una investigación realizada en Tailandia en un área con una pendiente de 20 a 25%, donde bajo diferentes intensidades de lluvia se encontró que para las intensidades de mayor potencial erosivo, el impacto de la disminución de la cobertura por un aprovechamiento aumenta considerablemente a partir de 30%.

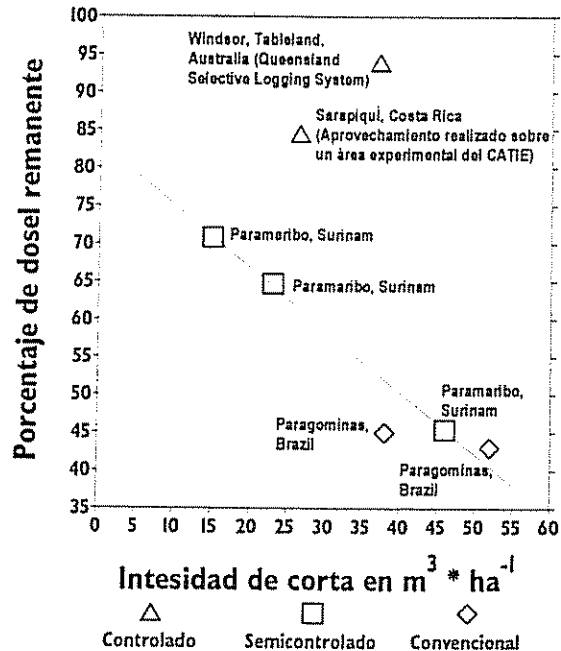


Figura 1: Relación entre el área de dosel remanente y la intensidad de corta en aprovechamientos selectivos de bosque tropical bajo diferentes niveles de supervisión y control de las operaciones (Jonkers, 1987; Uhl y Guimaraes, 1989; Koppelman, 1990; Crome et al, 1992; Verissimo et al, 1992; White, 1994)

**Cuadro 1. Cambios en la producción de agua y respuesta hidrológica de la cuenca después del aprovechamiento selectivo o aclareo parcial del bosque lluvioso tropical de tierras bajas (Traducción libre de Bruijnzeel, 1992).**

Sitio	Tipo de alteración de la cuenca	Cambio en producción de agua (mm * año <sup>-1</sup> )				Cambio en volumen del "quickflow" <sup>1</sup>	Cambio en el los flujos pico
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4		
Babinda, Queensland, Australia <sup>2</sup>	Aprovechamiento leve	NS	NS			NS	NS
	Aclareo del 67% del área de la cuenca seguida de la regeneración	265	325 <sup>W</sup>				
Rajpur, India <sup>3</sup>	Raleo de un bosque de <i>Shorea</i> de un 20%	Sin cambios detectables en los primeros dos años				No detectable	9% de incremento en año 1 NS después del año 2
Bukit Berembun, Malasia peninsular <sup>4,5</sup>	Aprovechamiento selectivo del 40% del volumen comercial	165 <sup>W</sup>	140	175 <sup>W</sup>	165	NS	NS
	Aprovechamiento supervisado del 33% del volumen comercial	85 <sup>W</sup>	70	105 <sup>W</sup>	95	NS	NS

<sup>1</sup> Escurrimento rápido del agua llovida subsuperficialmente por los macroporos y conductos internos del suelo y superficialmente en los suelos pobremente drenados o saturados temporalmente o permanente saturados y cercanos al sistema de canales (Mosley y Mckerchar, 1993)

NS: Efecto no significativo a una  $p < 0.05$  o  $< 0.01$

W: diferencias significativas por prueba de Wilcoxon.

### 3.1.1 El sistema de aprovechamiento:

El manejo forestal también influye en la respuesta hidrológica de la cuenca al alterar la alta capacidad de infiltración del suelo durante la extracción de los fustes de los árboles cortados (Guilman et al., 1985; Malmer y Grip, 1990), ocasionando un marcado incremento en la erosión y pérdida de nutrientes (Hamilton y King, 1983; Malmer y Grip, 1990).

Los suelos forestales se caracterizan por tener la capacidad de infiltrar la mayor parte del agua que llega al piso del bosque (Stadtmüller, 1994). No obstante esta capacidad queda disminuida luego de la extracción de la madera y es consecuencia: a) de la remoción parcial o total de la vegetación y de la capa de material orgánico del suelo durante la construcción de caminos de extracción y, b) de la compactación en mayor o menor grado de los horizontes superficiales (Malmer y Grip, 1990; Stadtmüller, 1994) producto del tránsito de maquinaria pesada (p.e. tractores de oruga y articulados) a través del piso del bosque.

La remoción de la capa de materia orgánica es especialmente perjudicial dado que esta cumple con la tarea de facilitar el proceso de infiltración e inhibir la destrucción de agregados y el desecamiento del suelo, evitando así la escorrentía superficial responsable de desencadenar los procesos de erosión.

Por otra parte la eliminación del dosel protector sobre los suelos alterados disminuye la cantidad de agua interceptada, lo que aumenta la precipitación neta produciendo una concentración de lluvia sobre estas áreas (Stadtmüller, 1994).

En cuanto a la compactación, esta es producto tanto del tránsito de maquinaria pesada, como de la exposición de horizontes más profundos del suelo durante la construcción de los caminos de extracción, los cuales por naturaleza tienen una densidad aparente (dry bulk density) mayor y por lo tanto una capacidad de infiltración menor a la de los horizontes superficiales removidos (Malmer y Grip, 1990).

Dicha pérdida de capacidad de infiltración, según investigaciones realizadas en Kalimantan y Sabah, puede verse disminuida hasta en más de un ochenta y cinco por ciento de la capacidad del bosque inalterado (Abdulhadi et al., 1981; Malmer y Grip, 1990), y es una condición que podría mantenerse aún después de seis años de haberse realizado el aprovechamiento (Malmer y Grip, 1990)

En Surinam, vías de extracción utilizadas ocho años atrás aún permanecían en el mismo estado de compactación y sin signos de recuperación, al menos en cuanto a densidad de suelo y conductividad del agua se refiere. Sin embargo esta situación no necesariamente es el caso de las vías secundarias utilizadas solamente durante el "winching" de los árboles, estas áreas por lo general presentan un rápido proceso de recuperación (Hendrison, 1990).

Debido a la pérdida de capacidad de infiltración de los suelos después del aprovechamiento es de esperar que en estas áreas la precipitación exceda fácilmente la capacidad de infiltración remanente, ocasionando volúmenes de flujo superficial de mayor magnitud y frecuencia a los que normalmente se producen bajo las áreas de bosque sin alteración alguna.

Por otra parte las partículas de suelo desprendidas al caer las gotas de lluvia sobre el suelo desprovisto de vegetación son incorporadas a dicho flujo superficial y transportadas hacia abajo siguiendo la pendiente del terreno (Linsley et al., 1977), produciendo por consiguiente grandes cargas de sedimento en las quebradas y ríos (Bruijnzeel, 1991).

Evidencia de lo anterior son los surcos en los caminos y trochas de extracción que se forman particularmente cuando el subsuelo mineral erosionable ha quedado expuesto luego de remover el horizonte orgánico. Tales áreas son fuente de erosión por largo tiempo y su recuperación al estado pre-aprovechamiento es poco probable que ocurra (Bruijnzeel, 1992)

Si bien está claro que la extracción comercial de madera incrementa la erosión (Hamilton y King, 1983), las diferentes cuantificaciones hechas en el trópico húmedo presentes en la literatura solamente dan una idea de la magnitud de dicho incremento, dado que este puede variar de una cuenca a otra como resultado de diferencias en la erosividad del sustrato geológico, relieve y características de la precipitación (Bruijnzeel, 1992).

En la figura 2 se aprecia cómo aún en cuencas vecinas, el incremento en la erosión producto del aprovechamiento varía también en el tiempo. Otra razón por la cual la cuantificación de esta respuesta hidrológica resulta sumamente difícil de estimar.

No obstante, a pesar de lo anterior, en el experimento de cuencas en pares (paired-catchment experiment) realizado por Zulkifli y Anhar, (1994) se muestra como el aprovechamiento aumenta marcadamente la tasa de producción de sedimentos, la cual un año después de realizadas las operaciones de extracción fue 12 veces mayor a la de la cuenca testigo.

Lo anterior coincide con Bruijnzeel (1992), quien argumenta que dicho incremento puede llegar a ser de 2 a 10 veces mayor que la erosión original de la cuenca, producto de la construcción de los caminos, con un aumento adicional de hasta 20 veces la erosión original durante las operaciones de extracción, produciéndose un descenso irregular hacia el valor inicial pre-aprovechamiento mientras la cobertura del dosel se recupera y la vegetación sobre las vías de extracción se regenera.

Si bien la magnitud del impacto de la extracción comercial de madera sobre la respuesta hidrológica de la cuenca está influenciada por factores biofísicos, este también depende del sistema de aprovechamiento que se utilice (Bruijnzeel, 1992; Hamilton y King, 1983), de la aplicación o no de una cuidadosa planificación, preparación y ejecución de las operaciones de aprovechamiento (Bruijnzeel, 1992) y naturalmente de la intensidad de corta.

Existen varios ejemplos de investigaciones al respecto realizadas en los Estados Unidos las cuales evidencian que el sistema de aprovechamiento es el factor que determina si ocurre o no un incremento significativo en la producción de sedimentos, y si este ocurre, por cuanto tiempo durará su efecto bajo las condiciones de pendiente, geología, suelos y patrón de precipitación del sitio (Hamilton y King, 1983).

Lo anterior responde a que la cantidad de área y tipo de daño que sufre el suelo está en función del método de aprovechamiento utilizado, donde sistemas de extracción con helicópteros o cables aéreos (high-line, skyline logging) por lo general producen una menor cantidad de suelo alterado (Hamilton y King, 1983), que los sistemas de extracción que involucran el arrastre de las trozas (p.e. ground cable logging y tractor logging). Esto se debe a que los primeros necesitan de una menor cantidad de caminos (Megahan y Schweithelm, 1983), además de que la superficie del suelo bajo las vías de los cables aéreos no sufre remoción ni compactación alguna, a pesar de que se destruye completamente la vegetación (Pearce y Griffith, 1980 citado por Bruijnzeel, 1991).



Por otra parte, a pesar de que la intensidad de corta, así como la planificación, preparación y control de las operaciones de aprovechamiento también afectan el impacto de la extracción en la respuesta hidrológica de la cuenca, por lo general los aprovechamientos de los bosques tropicales se realizan sin ninguna planificación, y las operaciones no están basadas en un inventario forestal ni el área de aprovechamiento es levantada antes de la corta de los árboles. Además de que las operaciones son organizadas y ejecutadas sin planificación, por cuadrillas sin experiencia. Produciéndose como resultado el desperdicio de madera y un considerable daño al bosque durante el aprovechamiento (Hendrison, 1990).

En la figura 3, se muestra claramente como la ausencia de planificación durante el proceso de extracción (aprovechamiento convencional) ocasiona un daño excesivo al quedar un alto porcentaje del piso del bosque ocupado por caminos o vías de aprovechamiento, donde para una misma intensidad de corta de alrededor de 6 árboles \* ha<sup>-1</sup>, el porcentaje de áreas de caminos puede variar desde un 5% (aprov. controlado) hasta un 14% (aprov. convencional), dependiendo de si durante el aprovechamiento hubo o no planificación y supervisión de las operaciones.

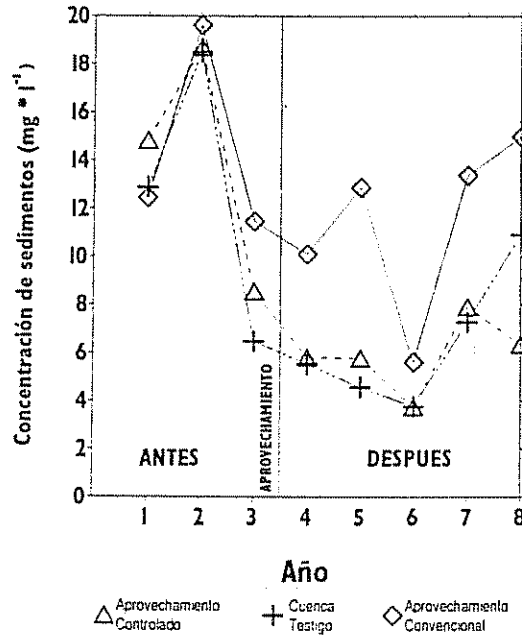


Figura 2 Media anual de concentración de sedimentos en suspensión en el flujo base de tres cuencas, una aprovechada en la forma convencional, otra con operaciones de aprovechamiento controladas y una cuenca testigo, ubicadas en la Reserva Forestal Berembun, Negri Sembilan, Malasia (Datos tomados de Zulkifli y Anhar, 1994)

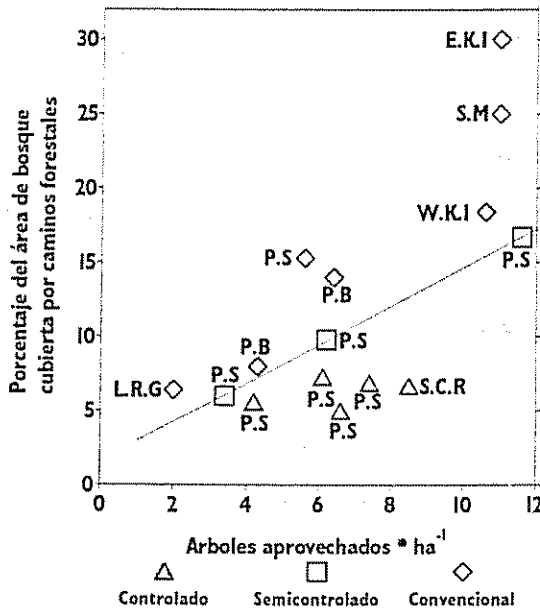


Figura 3 Porcentaje de área cubierta de caminos y vías de extracción en función de la intensidad de corta en bosques lluviosos tropicales en diferentes partes del mundo. Obsérvese como en el estudio de Jonkers (1987) en Paramaribo, Suriman (PS) se observa claramente como aumenta el área del piso del bosque disturbada conforme aumenta la intensidad de corta. (Fuente: EK1:East Kalimantan, Indonesia - Abdulhadi et al., 1981 - ; S.M: Sabah, Malaysia - Nussbaum, datos no publicados, 1992 citado por Nussbaum et al., 1995 - ; WKI: West Kalimantan, Indonesia - Cannon et al., 1994 - ; PS: Paramaribo, Surinam - Jonkers, 1987; Hendrison, 1990 - ; PB: Paragominas, Brazil - Ulh y Guimarães, 1989; Verissimo et al.,1992 - ; SCR: Sarapiquí, Costa Rica - Koppelman, 1990 - ; LRG: Lopé Reserve, Gabón - White, 1994 -).

### 3.1.2 Condiciones Biofísicas:

Existen condiciones biofísicas inherentes al sitio que lo hacen más o menos susceptible al impacto de la actividad de producción forestal. Por ejemplo la presencia de suelos de baja capacidad de infiltración natural que incentivan el flujo de escorrentía superficial, altas pendientes acompañadas de un patrón de precipitación de alta intensidad, y la geología de los suelos.

Estudios realizados en Nueva Zelanda, donde la vegetación fue removida hallaron que la estabilidad de la pendiente y la erosión en masa variaron en función de la geología, la pendiente y de la precipitación del sitio (Hamilton y King, 1983).

La erosión en masa es un movimiento en grupo relativamente rápido del suelo conocido comúnmente como deslizamiento. Este tipo de movimiento de suelo ocurre en pendientes fuertes usualmente mayores a los 30 grados (Megahan y Schweithelm, 1983).

Una gran parte de la estabilidad de los suelos del bosque es provista por las raíces de los árboles, las cuales después de un aprovechamiento mueren y gradualmente pierden su fuerza para sostener el suelo en su lugar (Megahan y Schweithelm, 1983). Por la tanto la simple corta de los árboles en áreas de pendiente fuerte aún con la más cuidadosas técnicas de extracción, resultará en una reducción en la capacidad de la masa radicular del sitio de sostener el suelo; razón por la cual la identificación previa de estas áreas es importante para excluirlas de toda actividad de aprovechamiento comercial (Hamilton y King, 1983).

Sin embargo existen dudas en cuanto a si la remoción de árboles disminuye la capacidad de la masa radicular de sostener el suelo y más bien al eliminar árboles del dosel superior los individuos jóvenes de los estratos inferiores se vean favorecidos con un incremento de la iluminación que llega al piso del bosque compensándose el efecto de la muerte de parte de la masa radicular vía aprovechamiento y en realidad lo que pueda producirse sea un aumento del crecimiento de las raíces de árboles jóvenes (Stadtmüller, 1994).

En cuanto a la geología y tipo de suelo donde es retirada la cobertura protectora, Linsley et al. (1977), argumentan que la erosión causada por el impacto de las gotas de lluvia es más fácilmente resistida en un suelo bien cimentado que en uno suelto. En general la erosión por impacto de la lluvia aumenta con el contenido de arena en el suelo debido a la pérdida de cohesión.

Por otra parte la erosión por impacto disminuye con el aumento en el contenido de agregados estables en el suelo. Un suelo cuyos agregados individuales no tienden a formar agregados será erosionado más fácilmente que uno que se aglutina (Linsley et al. 1977).

### **3.2 El efecto en la respuesta hidrológica de la cuenca y la pérdida de nutrientes**

Dado que el transporte de nutrientes es principalmente producto del movimiento del agua (Poels, 1989a), durante la explotación del bosque la fertilidad del sitio esta potencialmente amenazada debido al incremento en la erosión producto de la escorrentía superficial (Bruijnzeel, 1992); ya que cualquier partícula de suelo que es llevada a un río o quebrada carga consigo nutrientes a un flujo que finalmente abandonará la cuenca (Bruijnzeel, 1992; Hamilton y King, 1983), por lo tanto un aumento en la tasa de erosión significaría entonces un aumento en la pérdida de nutrientes en el ecosistema.

En el aprovechamiento del bosque tropical, la mayor parte de la erosión de los suelos (y por ende la mayor pérdida de nutrientes) se origina en los patios de acopio y vías de arrastre (Nussbaum et al., 1995), transitados por tractores o bulldozers y donde el suelo queda expuesto o bien sin la protección de la materia orgánica ni de la vegetación natural.

Gillman *et al* (1985) evaluaron el efecto del aprovechamiento selectivo sobre algunas propiedades químicas del suelo en un bosque lluvioso de North Queensland, Australia. El citado autor midió anualmente después del aprovechamiento durante un período de cuatro años (1978-1981) el contenido de C orgánico y N, además de Ca, Mg y K intercambiable

(entre otras cosas) en los caminos de extracción y en sus bordes, así como también en las áreas no alteradas durante el aprovechamiento.

Durante dicho período se presentó un ciclón en la zona (Ciclón Peter -1978-) y se observó que en las áreas donde quedó el suelo expuesto (caminos de extracción y bordes del mismo), el C orgánico y el N disminuyeron significativamente, efecto que los autores atribuyeron a la erosión causada por las lluvias torrenciales durante dicho evento. La disminución del carbón orgánico se estimó en un 15%.

Las bases intercambiables Ca, Mg, y K también disminuyeron pero solamente en la calzada de los caminos de extracción, en los domos conformados por el material removido del suelo durante la construcción del camino la disponibilidad de estos elementos aumentó. No se reportaron cambios en ninguno de estos elementos en las áreas no disturbadas a pesar del evento sucedido (ciclón).

Por otra parte Bruijnzeel (1992) argumenta que las operaciones de extracción podrían aumentar la salida de nutrientes del ecosistema mediante el proceso de lixiviación de una inesperada gran incorporación de material orgánico en descomposición sobre un suelo con la capacidad de infiltrar grandes cantidades de agua, y una reducción temporal en la capacidad de capturar los nutrientes en la vegetación dañada o en regeneración, aledaña al sitio disturbado. No obstante tanto el estudio de Gillman et al (1985), como el de Poels, (1989b) no reportan evidencia alguna de que por esta vía se produzca una pérdida significativa de nutrientes en el ecosistema.

### 3.4 Medidas para mitigar el impacto del aprovechamiento selectivo en la respuesta hidrológica del bosque lluvioso tropical:

#### a) Planificación de todas las operaciones

Existe amplia evidencia de que la clave para minimizar el impacto a la vegetación y al suelo es la planificación, preparación y ejecución cuidadosa de las operaciones forestales (Bruijnzeel, 1992). Mucha de la reducción del daño en bosques bien manejados son el resultado de una cuidadosa planificación del aprovechamiento (Dysktra y Heinrich, 1992 citado por Putz, 1994).

Antes del aprovechamiento se deben identificar las áreas potencialmente inestables, como depresiones húmedas, áreas de pendiente pronunciada, o bien áreas de suelo y substrato erosionable; así como también identificar la red de drenaje incluyendo los desagües intermitentes.

Laderas cóncavas en áreas de alta intensidad de precipitación con pendientes mayores al 50% deben considerarse como muy susceptibles a deslizamientos para construir caminos forestales (Adams y Andrus, 1992 citado por Stadtmüller, 1994). Una forma de reconocer estas laderas inestables es por la reptación que presentan los árboles (- parte inferior del fuste curvo, pero con la parte superior recta - (Dissmeyer, 1985 citado por Stadtmüller, 1994). Megahan y Schweithelm (1983) consideran que en tales laderas la extracción de fustes con tractores de oruga debe limitarse a pendientes inferiores al 25%.

Por otra parte el establecimiento y mantenimiento de zonas de protección en ambos lados de los ríos mantiene los flujos pico y la sedimentación en el caudal de la cuenca dentro de límites aceptables (Abdul Rahim, 1989 citado por Bruijnzeel, 1991).

Estas son áreas no alteradas que atrapan pendiente abajo las partículas de suelo erosionadas en los sitios alterados durante la extracción, no dejándolas formar parte de los sedimentos en las

quebradas; cumpliendo así una importante función de filtro y retención de nutrientes en la cuenca, además de minimizar los cambios en la temperatura del caudal de los ríos manteniendo así las fuentes de comida de los ecosistemas acuáticos (Hamilton y King, 1983; Bruijnzeel, 1992).

El ancho de la zona de protección debe establecerse en función de la pendiente del terreno, la naturaleza del sotobosque, el tipo de suelo y la intensidad de corta. Las recomendaciones de diferentes autores varían de 10 hasta 50 m, donde algunos hacen la salvedad de que debe establecerse no solamente en quebradas y ríos principales, sino también en los canales intermitentes (Kunkle, 1975 citado por Stadtmüller, 1994; Megahan y Schweithelm, 1983; Loughlin et al., 1980 y Cassells et al., 1984 citados por Bruijnzeel, 1992).

Estas áreas son en realidad también unidades de manejo y dado que su función depende del estado de la vegetación, cualquier tipo de aprovechamiento que se realice debe ser aplicado con una baja intensidad y sumo cuidado tratando de no afectar significativamente su capacidad de filtro y retención de nutrientes (Megahan y Schweithelm, 1983; Stadtmüller, 1994).

**b) Medidas a seguir en la planificación, establecimiento y mantenimiento de las vías de extracción:**

Los caminos y vías de arrastre deben planificarse en función de las características del terreno, el patrón de drenaje, el sistema de aprovechamiento a utilizar y el sistema silvicultural, procurando que la densidad de la red sea mínima, y que esta sea posteriormente construída en forma apropiada (Hamilton y King, 1983; Megahan y Schweithelm, 1983; Bruijnzeel, 1992).

Los patios deben colocarse sobre áreas firmes, secas, de pendiente suave y rodeadas de vegetación que actúe como filtro de la erosión superficial. Los caminos y vías de extracción deben mantenerse lejos de los cursos de agua, áreas saturadas y pendientes mayores al 30%.

En suelos susceptibles a la erosión las vías de extracción transitadas por tractores de oruga deben limitarse a áreas con pendientes menores al 25% (Megahan y Schweithelm, 1983).

En muchos casos la ubicación ideal de los caminos está en la parte superior de las lomas (Bruijnzeel, 1992), en estas áreas el riesgo de deslizamiento es menor y los sedimentos producidos durante la eventual erosión de los caminos es poco probable que lleguen a los ríos o quebradas (Adams y Andrus, 1992 citado por Stadtmüller, 1994).

En la medida de lo posible el diseño de la red vial debe procurar que el arrastre y extracción de las trozas sea cuesta arriba para así evitar el cruce de quebradas, y que el patrón de la red de caminos concentre la esorrentia superficial (Megahan y Schweithelm, 1983; Bruijnzeel, 1992; Putz, 1994; Dykstra y Heinrich, 1996).

Los caminos deben evitar el cruce de quebradas y ríos, y en caso de hacerlo debe procurarse que sea en ángulo recto utilizando puentes con vigas o alcantarillas para así reducir la sedimentación (Hamilton y King, 1983; Megahan y Schweithelm, 1983). El uso de rellenos en los cruces de quebradas o ríos utilizando tierra y troncos debe evitarse a toda costa (Gilmour, 1971). El perfil de los caminos debe ser inclinado o bombeado para que el agua no se estanque, infiltre o escurra por encima del camino causando erosión (Stadtmüller, 1994).

La construcción de la red de caminos y vías de extracción debe realizarse durante la época seca con la anticipación necesaria para que esta se estabilice antes de someterla a un uso intensivo (Bruijnzeel, 1992), y procurarle mantenimiento y sistemas de drenaje apropiados durante la época lluviosa (Gilmour, 1971; Megahan y Schweithelm, 1983; Hamilton y King, 1983; Stadtmüller, 1994).

El sistema de drenajes debe diseñarse en función del régimen de lluvias, la pendiente, la posición topografía con respecto a la ladera, la loma y la quebrada (Packer 1967 y Rothacer, 1970 citados por Stadtmüller, 1994). De acuerdo a lo anterior Dissmayer (1985) citado por



Stadtmüller (1994). provee como guía la siguiente fórmula para determinar el distanciamiento que debe existir entre drenajes transversales:

**Ecuación 1**

$$E = \frac{130}{S}$$

donde E= espaciamento en metros  
S= % de pendiente

Megahan y Schweithelm (1983) por su parte recomiendan utilizar la siguiente relación:

**Ecuación 2**

$$E = 87 - 1.8 * S + 0.0105 * S^2$$

donde E= espaciamento en pies  
S= % de pendiente

La construcción de estos drenajes debe realizarse tan pronto como sea posible luego de que el suelo es alterado, también es importante aplicar otras medidas de control de erosión, como cubrir las pistas con ramas y hojas para disminuir la exposición del suelo mineral (Pobedinski, 1970 citado por Stadtmüller, 1994).

El seguimiento de las anteriores medidas preventivas puede reducir significativamente la producción de sedimentos durante el aprovechamiento (Gilmour, 1971; Kasran , 1988; Zulkifli y Anhar, 1994).

**e) Medidas a seguir durante extracción y arrastre de los fustes**

La magnitud de la apertura del dosel protector no debe exceder el 30% (o bien estar entre un 30 y 40% del área basal) ya que a partir de este punto la escorrentía y la erosión tienden a aumentar fuertemente. Los claros producidos en dicha intervención deben estar distribuidos homogéneamente por toda el área en forma de mosaico para así garantizar que los posibles focos temporales de erosión sean inmediatamente amortiguados por las zonas aledañas no intervenidas (Stadtmüller, 1994).

Dichos claros deben ser tan pequeños como sea posible, especialmente en las áreas con alto riesgo de deslizamiento (Megahan y Schweithelm, 1983). En ciertos casos puede llegar a ser necesaria la corta pre-aprovechamiento de las lianas que amarran varios árboles que ocasionan un descontrol de la caída de los árboles provocando claros más grandes de lo necesario (Ewel y Combe, 1980 citados por Stadtmüller, 1994; Bruijnzeel, 1992).

En cuanto a la extracción y arrastre de los fustes cortados, se sabe que una rápida y adecuada regeneración de las vías de aprovechamiento es la mejor garantía para evitar la erosión (Hamilton y King, 1983; Megahan y Schweithelm, 1983), por lo tanto durante esta actividad debe procurarse el menor disturbio posible al suelo, para tal efecto se recomiendan las siguientes medidas citadas por Megahan y Schweithelm (1983), Bruijnzeel (1992), Stadtmüller (1994), Putz (1994) y Dykstra y Heinrich (1996),

- Utilizar técnicas de tala dirigida para facilitar la extracción de los fustes hacia la pista de arrastre mediante el uso del winch. Para tal efecto es necesario utilizar el equipo y herramientas necesario, así como también la capacitación y supervisión del personal encargado.
- Minimizar el uso de la pala para abrirse espacio a través del sotobosque, la apertura de la vegetación de las vías de maderero se recomienda que sea a mano y dejar el material cortado sobre la pista para que funcione como una capa protectora del suelo durante el tránsito de la maquinaria. Otra alternativa es operar el equipo sin la pala para evitar la remoción innecesaria de suelo durante la extracción.
- Las vías de extracción deben ser lo más angostas posibles; 4.5 m es un ancho máximo apropiado cuando se utiliza maquinaria pesada.
- Las curvas sumamente cerradas también deben evitarse para proteger la vegetación aledaña al camino de maderero.
- Restringir el tránsito de la maquinaria a las vías de extracción y patios de acopio, además de maximizar el uso del winch. Cuando este control no es implementado de 30 a 40% de

las áreas sufren el impacto directo de los bulldozers a pesar de que solamente entre 10-12 árboles \* ha<sup>-1</sup> son extraídos.

- Utilizar tractores de llantas en lugar de orugas ya que los primeros ocasionan un menor daño a los árboles remanentes y producen una menor erosión y compactación en las pistas de arrastre<sup>2</sup>.
- Utilización de arcos de madereo o bien levantar el extremo de la troza para evitar que se entierre en el suelo.
- Suspender las actividades de extracción durante días lluviosos para evitar la compactación excesiva del suelo.
- Supervisión y control de las operaciones: la implementación de las guías expuestas anteriormente tiene que ser garantizada por medio del control honesto y estricto de parte de los profesionales forestales y por medio de la capacitación del personal que ejecute los trabajos de campo.

### c) Medidas a seguir después del aprovechamiento

El aprovechamiento sostenible del bosque no ha terminado si el último fuste no ha sido extraído. El cierre de las áreas de aprovechamiento debe incluir la remoción de cualquier cruce de quebrada que impida el flujo del agua y además de procurar la regeneración de las áreas perturbadas. La reforestación y fertilización de suelos severamente compactados puede reducir la erosión. Por último, una vez que el aprovechamiento es terminado, las estructuras de drenaje de las rutas de arrastre deben ser instaladas o reparadas (Putz, 1994).

---

<sup>2</sup> si estos se utilizan con llantas de baja presión

### 3.5 Planificación de caminos de maderero en el aprovechamiento forestal.

Una adecuada red de caminos de maderero es de fundamental importancia para la producción sostenida del bosque. Esta es la base de un manejo cuidadoso del bosque y es prerequisite para la comercialización exitosa de la madera aprovechada (Becker y Jaeger, 1992). Esta debe proveer acceso a los productos del bosque a bajo costo, servir a las necesidades de manejo y protección del bosque, minimizar la erosión y sedimentación que causa su establecimiento; tener un buen diseño y practicas de mantenimiento, además de una área de patios y caminos mínima (Dykstra y Heinrich, 1996)

Entre las consecuencias de un inadecuado diseño, construcción y mantenimiento de los caminos forestales, además del incuestionable efecto sobre la respuesta hidrológica de la cuenca (discutido en el acápite 3.1), se encuentran: a) altos costos de construcción, mantenimiento y transporte, b) corta vida útil de los caminos con la consecuente necesidad de tener que construir nuevos caminos y c) perturbación de áreas de apareamiento o rutas de migración de especies de animales (Dykstra y Heinrich, 1996)

Una red de caminos forestales está conformada basicamente por dos tipos de vías: *carreteras de transporte y caminos de maderero*. Las primeras constituyen la parte de la red por la que se transporta el material explotado a partir de los cargaderos secundarios u ocasionalmente primarios hasta la industria o hasta el punto de embarque (FAO, 1978).

Estas se subdividen a su vez en dos clases de carreteras: *Carreteras "A"*: Son las vías de acceso de primer orden o principales con una calidad de construcción relativamente alta que pueden ser utilizadas por los camiones durante todo el año. En las zonas tropicales suelen tener dos direcciones y las carreteras con capa de superficie alquitranada sólo se emplean cuando hay una alta densidad de tráfico. *Carreteras "B"*: Son las vías de segundo orden o secundarias, las cuales subdividen el bosque en secciones independientes de explotación y sirven para comunicar los cargaderos con las carreteras de primer orden. Tiene una calidad de

construcción más sencilla y las pueden utilizar los camiones sólo en condiciones favorables de tiempo (FAO, 1984).

Los caminos de maderero son las vías que van desde los cargaderos a borde de carretera hacia atrás, hasta la zona de corta. En terreno plano y ondulado estos caminos utilizan normalmente el suelo forestal sin alterar. En los bosques tropicales se utilizan con frecuencia tractores de oruga con capacidad de penetración para despejar los caminos y para concentrar las trozas para los tractores forestales arrastradores más rápidos y económicos (FAO, 1978; 1984).

**Cuadro 2: Características generales de los diferentes tipos de carreteras forestales en montes altos tropicales**

Carretera	Uso de la carretera	Anchura de la carretera: calzada incluyendo bermas (m) <sup>1</sup>	Anchura de la calzada (m) <sup>1</sup>	Radio mínimo de curva en (m)	Pendiente máxima (%)	Cargas de camión por día	Velocidad de circulación en (km*hr <sup>-1</sup> )	Coste estimado \$ EE.UU.*m de carretera
Carretera de acceso	camioneta pick-up permanente	9 - 12	7 - 10	50	6 (8) <sup>2</sup>	más de 50	50 - 60	10-15
Carretera forestal de primer orden	camioneta pick-up permanente	8 - 10	6 - 8	30	8 (10) <sup>2</sup>	hasta 50	25 - 40	7-10
Carretera forestal de segundo orden	camioneta pick-up temporal	6 - 8	5 - 6	20	10 (12) <sup>3</sup>	hasta 6	15 - 25	1 - 7
Camino de maderero	tractor arrastrador de ruedas		3.5 - 4.5					0.3 - 1
Pista de arrastre	tractor de cadenas		3.5 - 4.5					0.05 - 0.1

Tomado de Einrich, 1975, citado por FAO, 1984.

1. En topografía muy inclinada y difícil hay que reducir considerablemente las anchuras de carreteras dadas anteriormente.
2. Pendiente máxima en topografía muy inclinada y difícil, para camiones descargados, cuando circulan cuesta arriba
3. Pendiente máxima en topografía muy inclinada y difícil, para distancias cortas.

La literatura no reporta referencias de densidad óptima para estos dos tipos de caminos forestales en condiciones de aprovechamiento selectivo de bosques tropicales. Sin embargo debido a que en estos bosques muchas veces la unidad de planificación es el árbol individual en lugar del rodal, además de que el volumen de madera aprovechable por hectárea es relativamente bajo, la densidad óptima de caminos por lo general es superior a los 100 m por cada 1000m<sup>3</sup> de madera reportado para los bosques templados, en países industrializados (Dykstra y Heinrich, 1996).

### **3.5.1 Diseño integrado de caminos forestales utilizando Sistemas de Información Geográfica.**

Los SIG son sistemas computarizados de adquisición, almacenamiento, despliegue y análisis geográfico de datos distribuidos espacialmente, definidos por puntos, líneas o áreas, organizadas en capas y que representan modelos del mundo real - mapas - (Velázquez, 1994; Lull et al, 1995).

Dichos sistemas tienen la capacidad de transformar, manipular y analizar interactivamente grandes cantidades de información de tipo ambiental en forma rápida, eficiente y expedita, permitiendo realizar estudios de procesos ambientales, análisis de tendencias o bien anticiparse a los posibles resultados de una determinada decisión de manejo (Velázquez, 1994; Lull et al, 1995).

Para realizar dichos análisis el SIG cuenta con cuatro tipos de herramientas: a) consulta a la base de datos, b) álgebra de mapas, c) operadores de distancia y d) operadores de contexto. El primer grupo de herramientas es la más fundamental que provee un SIG e involucra la sobreposición lógica de mapas. Por su parte el segundo grupo permite realizar la combinación y modelación de mapas de manera matemática.

Los operadores de distancia son un grupo de técnicas donde la distancia juega un papel clave en el análisis, especialmente en el establecimiento de zonas de amortiguamiento, así como

también análisis de rutas de menor costo. Finalmente los operadores de contexto realizan lo que se conoce como análisis de superficie, de cuencas y de exposición visual entre otros (Velázquez, 1994).

Por ejemplo con un SIG, información relacionada con el tipo de bosque, categorías de pendiente, tipos de suelo, patrón de drenaje y clases de erosión puede ser relacionada con representaciones espaciales o mapas y luego ser analizada para así identificar las áreas de protección hídrica en un área donde se realizará un aprovechamiento forestal. Un ejemplo de este tipo de análisis lo realizó Bren (1995), quien examinó la extensión y distribución de las áreas de protección hídrica en sitios destinados para el aprovechamiento forestal para diferentes anchos de franja utilizando un sofisticado SIG (Arc/Info) en una cuenca del Río Tarago de 65 km<sup>2</sup> ubicada al oriente de Victoria, Australia, con el fin de estudiar su efecto en las operaciones forestales.

Esta capacidad de análisis y modelaje está haciendo que el SIG se convierta en una poderosa herramienta de apoyo para el manejo de los recursos naturales (Brown et al, 1994; Lull et al, 1995). En la industria forestal la introducción de los SIG ha abierto la posibilidad de incrementar la eficiencia en los procesos de planificación del aprovechamiento y ha aumentado el entendimiento del potencial del sitio, así como también ha sido una herramienta útil para minimizar el impacto de las operaciones del aprovechamiento para que mantener en el largo plazo la productividad (Brownlie y Terlesk, 1995).

Por otra parte, el SIG integrado con técnicas interactivas de planificación se ha constituido en un nuevo método de diseño de caminos con el cual se ha mejorado este complejo y detallado proceso de planificación y evaluación. Con este método la ubicación de las posibles rutas pueden ser interactivamente planificadas mediante un programa de diseño de caminos asistido por computadora (en inglés denominado CAD) utilizando Modelos de Elevación Digital (MED). Las rutas planificadas son posteriormente comparadas en términos de parámetros funcionales como por ejemplo movimientos de tierra necesarios para finalmente seleccionar la mejor ruta evitando realizar costosas mediciones de campo (Becker y Jaeger, 1992).

En un área de bosque tropical de 96000 ha ubicado en Indonesia, Setyabudi (1994) realizó una aplicación similar a la anterior donde mediante el análisis espacial de condiciones biofísicas se diseñó una red de caminos principales asistido por computadora, tratando de minimizar tanto los costos de construcción, como los de operación para así optimizar el aprovechamiento.

En el proceso de selección de la ruta más apropiada se consideraron los costos de utilizar un camino forestal existente, el costo de construir puentes en los ríos amplios, el costo de instalar alcantarillas para las quebradas, el costo de utilizar un camino público y por último, el costo de rehabilitar un camino forestal inhabilitado. Nuevamente, como en el caso anterior fue necesario utilizar un Modelo de Elevación Digital (MED) para así poder tener una idea de cual podría ser el costo de construcción del camino (cortes y rellenos principalmente) por determinada ruta.

### **3.5.2 Aspectos básicos del método kriging para la interpolación de modelos elevación digital (MED)<sup>3</sup>**

Kriging es un método geoestadístico de interpolación que ha probado ser útil y popular en muchos campos (Kecler, 1995). En el campo de las variables de suelo se pueden encontrar ejemplos de su utilidad e implementación en Burgess y Webster (1980a), (1980b), Webster y Burges (1980) y McBratney y Webster (1986) y Burgess et al (1981). En el campo del manejo integrado de plagas se puede citar la publicación de Lecoustre et al (1989).

En la actualidad este método esta siendo muy usado en la interpolación de modelos de elevación digital (mapas de curvas de nivel) para la planificación del aprovechamiento forestal en los planes de manejo en Costa Rica.

Este método provee, a partir de una muestra de puntos ya sean regular o irregularmente distribuidos, valores estimados de aquellos sitios donde no hay información, sin sesgo y con



una varianza mínima conocida. Para tal efecto, dicho método depende del cálculo de un semivariograma preciso, con el cual se mide la naturaleza de la dependencia espacial de la variable y cuyas estimaciones de semivarianza son utilizadas en las ecuaciones de kriging (Burgess y Webster, 1980a).

Para poder utilizar el método kriging para la interpolación de modelos de elevación digital existen tres aspectos que deben conocerse previamente acerca de la variable elevación: el semivariograma, el efecto nugget y la presencia o no de un componente estructural ó “drift” (Keeler, 1995) en los datos de elevación. A continuación se detalla acerca de estos tres aspectos.

#### a) El drift

Kriging tiene dos formas para ser aplicado, como “Ordinary Kriging” ó “Universal Kriging”. El primero asume que la variación en los valores de  $z$  está libre de cualquier componente estructural (drift), ya que en algunos casos la variación en los valores de  $z$  podría presentar tendencias locales. Webster y Burgess (1980), mencionan que gran parte de la evidencia de dichas tendencias está contenida en los semivariogramas, donde la presencia de un “drift” produce una suave curva parabólica, concava hacia arriba cerca del origen que puede ser ajustada con un modelo gaussiano.

Universal Kriging asume que dicha tendencia de variación espacial está presente en los datos y es la suma de tres componentes: uno estructural (drift), uno aleatorio pero correlacionado espacialmente, y el error residual. El componente estructural representa una tendencia constante sobre la superficie. El aleatorio se asume espacialmente independiente y con distribución normal. Existen dos formas de ajustar el drift, con un modelo lineal o con uno

---

<sup>3</sup> La mayor parte de lo expuesto en este acápite fue tomado de McBratney y Webster (1986). Lo que no fue citado por dicho autor tiene su respectiva fuente.

cuadrático. En datos de elevación la presencia de un “drift” responde a si hay una pendiente general en el terreno <sup>4</sup>.

### b) El semivariograma:

Mediante la geoestadística es posible describir la variación espacial de una variable referenciada espacialmente. Por ejemplo considérese una variable que varía en forma continua en un espacio geográfico tal como  $z = \text{porcentaje de arcilla}$  y que toma valores  $z(x_i)$  en lugares  $x_i$  donde  $i=1,2,\dots,i$  y  $x$  representa el juego de coordenadas en 1, 2o 3 dimensiones. Si se consideran los valores de  $z$  en dos sitios,  $x$  y  $x+h$ , donde  $h$  es un vector que indica tanto la distancia de separación como la dirección, entonces la varianza estará dada por:

$$S^2 = \{z(x) - \bar{z}\}^2 + \{z(x+h) - \bar{z}\}^2 = \frac{1}{2}[z(x) - z(x+h)]^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

donde  $\bar{z}$  es la media de los dos valores y  $S^2$  es la varianza específica para  $x$  y  $x+h$ .

El cálculo de dicha variación considerando la totalidad de los pares observados separados por un vector  $h$  es posible si la variable  $z$  es producto de un proceso aleatorio y cumple con las siguientes condiciones:

a) El valor esperado  $E$  de los valores en las distintas ubicaciones  $x$  es:

$$E[z(x)] = m \quad \text{Ecuación 4}$$

b) La varianza de las diferencias depende de  $h$  y no de  $x$ , y está dada por:

$$\text{Var}[z(x) - z(x+h)] = E[\{z(x) - z(x+h)\}^2] = 2\gamma(h) \text{ SI } E[z(x)] = 0 \quad \text{Ecuación 5}$$

Estas dos condiciones constituyen la hipótesis intrínseca de la **teoría de la variable regionalizada** en la cual se basa la geoestadística y donde básicamente lo que se asume es que la variación espacial de  $z$  es estadísticamente homogénea a través de la superficie o bien el mismo patrón de variación puede observarse en todos los sitios de la superficie.

<sup>4</sup>Leclerc Gregorio PhD en teledetección y experto en SIG, comunicación personal

Entonces, basados en dicha hipótesis es que se puede estimar la semivarianza de una muestra a partir de una única comprensión del proceso:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} \{z(x) - z(x+h)\}^2 \quad \text{Ecuación 6}$$

donde  $m(h)$  es igual al número de pares observados separados por un vector  $h$ .

La cantidad  $\gamma$  presente en las ecuaciones 3 y 4 es conocida como la **semivarianza**, cuya representación gráfica ( $\gamma(h)$  "vs"  $h$ ) es conocida como el **semivariograma** donde la función que ajuste la distribución de los puntos ploteados relaciona a  $\gamma(h)$  con  $h$  (ver figura 4). La mayoría de los procesos geoestadísticos están basados en dicha función ya que el semivariograma es la llave para entender, predecir y describir cuantitativamente la variación de una variable regionalizada.

Existen dos tipos de semivariogramas, los **infinitos** que presentan un incremento sin límite y no existe una varianza finita a priori; y los **transitivos** que conforme el vector  $h$  o lag se incrementa la semivarianza también se incrementa hasta alcanzar un punto máximo, el cual se mantiene más allá del incremento de  $h$ .

En los semivariogramas transitivos, conforme la distancia  $h$  aumenta la variable  $z$  se convierte más irregular en promedio, pero existe un lag finito dentro del cual toda la variación es alcanzada. Este lag se conoce como el **rango del semivariograma**, y marca el límite de dependencia espacial de la variable estudiada. La varianza máxima es conocida como **sill del semivariograma**, el cual es a priori la varianza de  $z$ .

Una variable con un semivariograma transitivo no es solamente intrínseca, sino también estacionaria de segundo orden donde se tiene como constante para todas las  $x$  que el

$$E[z(x)] = \mu \quad \text{Ecuación 7}$$

y la covarianza está definida por

$$C(h) = E[z(x) - z(x+h)] - \mu^2 \quad \text{Ecuación 8}$$

donde si  $h=0$  entonces

$$C(0) = E[z^2(x) - \mu^2] = \sigma^2 \quad \text{Ecuación 9}$$

; el semivariograma fácilmente es complementario a la función de covarianza dado que

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad \text{Ecuación 10}$$

y la autocorrelación  $\rho(h)$  esta definida como:

$$\rho(h) = \frac{C(h)}{C(0)} = 1 - \frac{\gamma(h)}{C(0)} \quad \text{Ecuación 11}$$

Para realizar el ajuste de la distribución de los pares ordenados  $(h, \gamma(h))$  es necesario que el modelo presente tres elementos: un intercepto con el eje de las ordenadas, una sección de crecimiento monótono y un sill (ver figura 4).

Además se debe tener presente que no se puede utilizar cualquier tipo de modelo para ajustar los valores de  $\gamma(h)$  con respecto a  $h$ , solamente se pueden utilizar aquellos que cumplan con la condición de ser modelos negativos condicionales semi-definidos o limitados ("conditional negative semi-definite -CNSD-").

McBratney y Webster (1986) ofrecen la explicación algebraica de tal restricción y agrega que tal condición es difícil de probar para determinado modelo en particular, por lo tanto lo más recomendable es trabajar con los modelos listados por Matern (1960) y Journel y Huijbregts (1978) citados por los autores anteriores, donde las combinaciones de modelos para el ajuste de un semivarianza están permitidas.

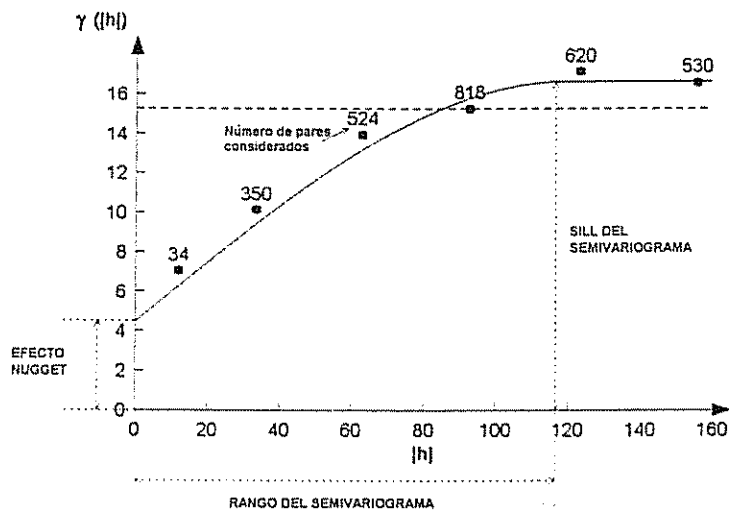


Figura 4: Ejemplo de un semivariograma

Entre los modelos de semivariogramas transitivos que cumplen con las condiciones anteriores se encuentran:

**Modelo lineal con sill:**

$$\gamma(h) = C_0 + \frac{C * h}{a} \quad \text{si } 0 < h < a \quad ; \quad \gamma(h) = C_0 + C \quad \text{si } h > a \quad \text{Ecuación 12}$$

donde  $C_0$  es el efecto nugget y  $a$  el rango de la semivarianza.

**Modelo circular:**

$$\gamma(h) = C_0 + C * \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{a} \right) + \frac{2h}{\pi a} \sqrt{1 - \frac{h^2}{a^2}} \right\} \quad \text{Ecuación 13}$$

si  $0 < h < a$ ;  $\gamma(h) = C_0 + C$  si  $h > a$

donde  $C_0$  es el efecto nugget y  $a$  el rango de la semivarianza.

**Modelo esférico:**

$$\gamma(h) = C_0 + C * \left\{ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} * \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right\} \quad \text{si } 0 < h < a; \quad \gamma(h) = C_0 + C \quad \text{si } h > a \quad \text{Ecuación 14}$$

donde  $C_0$  es el efecto nugget y  $a$  el rango de la semivarianza.

**Modelo gaussiano:**

$$\gamma(h) = C_0 + C * \left\{ 1 - e^{\left( \frac{-h^2}{r^2} \right)} \right\} \quad \text{Ecuación 15}$$

donde  $C_0$  es el efecto nugget y  $a$  el rango de la semivarianza.

Mcbratney y Webster (1986) mencionan que el modelo esférico parece ser claramente apropiado para cuerpos rocosos tridimensionales, y es más usado en levantamientos mineros. Es obviamente menos relevante para distribuciones en una y dos dimensiones, sin embargo ha descrito bien tales variaciones en variables de suelo y ha resultado ser mejor que los modelos lineal y circular.

El citado autor agrega que aunque se puede utilizar un modelo esférico para semivariogramas de variables de suelo en una y dos dimensiones, no pueden utilizarse para variables en tres dimensiones, así como tampoco los modelos lineales pueden ser usados en variables distribuidas en dos y tres dimensiones. Esto responde a que el semivariograma circular cumple con el condicionamiento CNSD en una y dos dimensiones pero no en tres; y el modelo lineal cumple con dicha condición solamente en una dimensión. En cuanto al uso del modelo gaussiano no hay reportes de su aplicación en variables de suelo.

Los modelos infinitos que pueden ser utilizados son el modelo logarítmico y el lineal sin sill; con el primero se ha realizado gran parte de la estimación estadística inicial en la industria minera por su facilidad de linealización y ajuste sin computadora. Estos modelos tienen la

característica de que describen situaciones en donde se asume que el terreno varia crecientemente sin límite conforme aumenta el área

**Modelo logarítmico:**

$$\gamma(h) = k * \log(h) \quad \text{Ecuación 16}$$

**Modelo lineal sin sill:**

$$\gamma(h) = C_0 + C * \frac{h}{a} \quad \text{Ecuación 17}$$

donde  $C_0$  es el efecto nugget y  $a$  el rango de la semivarianza.

Por otra parte, también debe tenerse en cuenta que los modelos anteriores pueden ser utilizados para describir la variación de la misma forma en todas direcciones (modelos isotrópicos), o bien en forma distinta para cada dirección (modelos anisotrópicos) en donde cada dirección tiene su propio semivariograma (McBratney y Webster, 1986)

Para el segundo caso si en un área la variación de la variable  $z$  separada por un vector  $h$  difiere según la dirección del vector se dice que existe **anisotropía** en los datos. Y si esta puede ser estimada mediante una simple transformación lineal de las coordenadas se dice que presenta **anisotropía geométrica**, cuya transformación tiene la siguiente fórmula:

$$a = \left\{ A_1^2 \left[ \cos^2(\theta - \phi) \right] + A_2^2 \left[ \sin^2(\theta - \phi) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Esta función es un factor que puede ser aplicado al parámetro de distancia de un modelo transitivo o a la pendiente de un modelo infinito. Los parámetros  $A_1$  y  $A_2$ , definen el rango o pendiente máxima y mínima del modelo, y  $\Phi$  es el ángulo de la máxima pendiente o rango. La razón  $A_1/A_2$  es una medida de la anisotropía.

### c) El efecto nugget

Otra característica importante de los semivariogramas es que aunque por definición  $\gamma(0)=0$  el límite de  $\gamma(h)$  cuando  $h$  tiende a cero no es necesariamente cero. Cuando esto sucede es conocido como el **efecto nugget** y el intercepto es conocido como **varianza nugget** (ver figura 4). En principio esto puede suceder solamente si hay discontinuidades en la función aleatoria. Para una variable continua esto es puede ser producto de errores de medición y variaciones sobre distancias mucho más pequeñas que los intervalos de muestreo más cercanos (Kecler, 1995).



## 4. MATERIALES Y METODOS

### 4.1 Descripción del área de estudio:

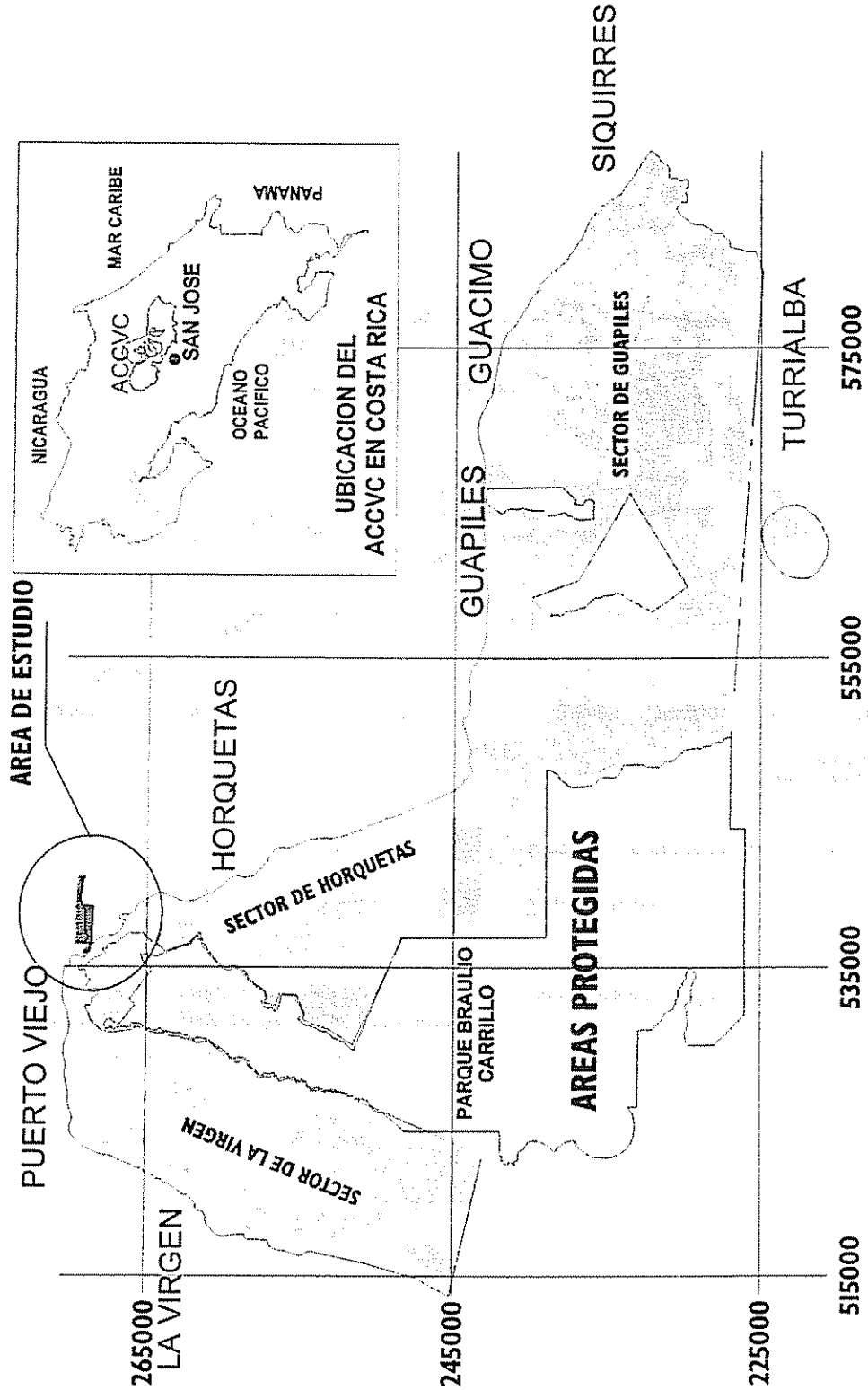
El estudio se realizó en un bloque de bosque húmedo tropical de tierras bajas ubicado en la provincia de Heredia, Costa Rica, a un kilómetro al este de Puerto Viejo de Sarapiquí, colindante con la Estación Biológica La Selva (ver mapa 1)

En el sitio la precipitación promedio es de 4015 mm variando de 2900 a 5600 mm, la mayor parte de la misma cae en dos períodos (de junio a agosto y de noviembre a diciembre), sin embargo durante todos los meses cae una apreciable cantidad de lluvia. (Lieberman et al, 1985).

Este bloque comprende unas 344.2 ha de bosque de topografía ondulada con pequeñas colinas y áreas planas anegadas. El mismo se encuentra dominado por *Pentaclethra maculosa* (Gavilán) y *Goethalsia meiantha* (Guácimo), especies maderables que representan el 80% de los individuos arriba de 30 cm de dap en el bosque. Debe aclararse que esta dominancia puede responder a una intervención realizada 15 años atrás en la cual fueron aprovechadas la mayor parte de las especies de madera dura, excluyendo el *Dipterix panamensis* (Almendro).

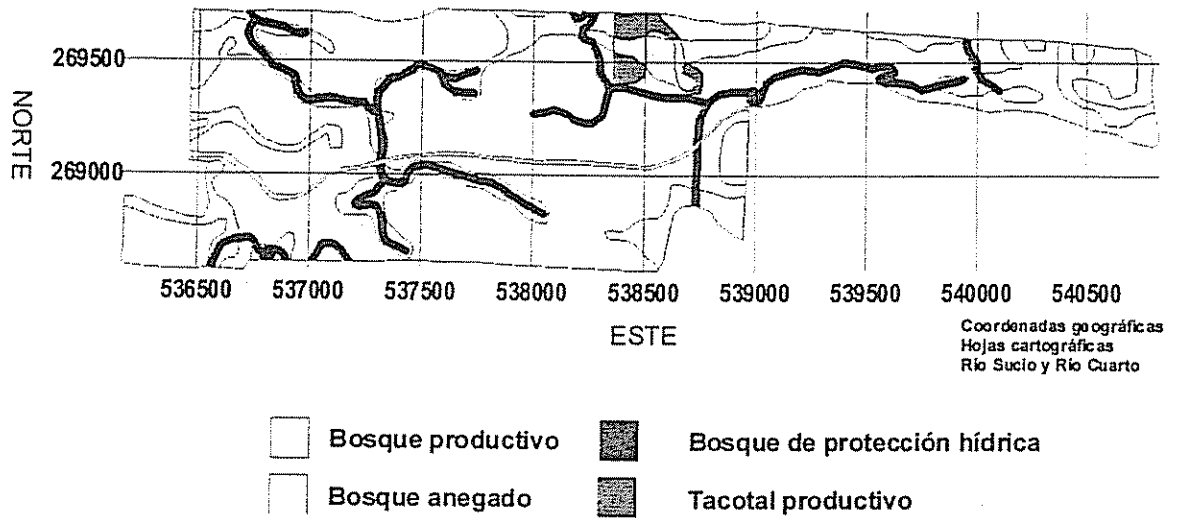
Según las restricciones técnicas y legales vigentes a 1996, de dicho bosque un total de 240.7 ha son aptas para la producción de madera; 52.6 ha tienen limitaciones de producción por anegamiento en época lluviosa y un total de 50.9 ha corresponden a zonas de protección hídrica y áreas anegadas todo el año (ver mapa 2).

Por otra parte, el volumen promedio a extraer en éste bosque se estableció en  $6.69 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , correspondiente a un promedio de fustes para extracción de  $3.78 \text{ árboles} \cdot \text{ha}^{-1}$ , lo que refleja una intensidad de corta extremadamente baja.



Mapa 1: Ubicación del sitio de estudio.

**PLAN DE MANEJO DE BOSQUE NATURAL  
FINCA PROPIEDAD FAMILIA STARKE  
Sarapiquí, Heredia. Costa Rica.**



**Mapa 2: Mapa de tipo de bosque y zonas de protección del recurso hídrico del bloque de bosque natural donde se realizó el estudio. Puerto Viejo de Sarapiquí, Costa Rica.**

#### 4.2 Evaluación del diseño de vías de transporte menor asistido por computadora

Para conocer las bondades del diseño de vías de transporte menor asistido por computadora se aprovechó un bloque de aproximadamente 15 ha de bosque (bloque 2), siguiendo una propuesta cuyo diseño se realizó utilizando el algoritmo Pathway de Idrisi for Windows 2.002.

Este módulo realiza una selección automatizada de entre todas las rutas posibles que unen dos puntos en una superficie de costo determinada, seleccionando finalmente aquella con la cual el costo total de desplazamiento es el mínimo posible.

Para correr dicho algoritmo, cualquiera que sea la aplicación, es necesario construir primero una *superficie de fricción* sobre la cual el mismo pueda identificar la ruta de menor costo de desplazamiento.

En el caso del aprovechamiento del guácimo utilizando un tractor agrícola de llantas sencillo y con una cuadrilla de dos personas, los parámetros utilizados para construir dicha *superficie de fricción* se obtuvieron a partir de un estudio de tiempo consumido por cada una de las operaciones ejecutadas durante el aprovechamiento de un bloque de aproximadamente 15 ha de bosque en el área de estudio (bloque 1) cercano al bloque 2, el cual el diseño de las vías de transporte menor se realizó manualmente

El diseño de las vías de transporte menor (*en adelante llamadas vtm*) practicado en el bloque 1, se realizó in situ durante el aprovechamiento basandose en la información proporcionada por un mapa base de aprovechamiento conforme se fueron cortando los árboles, procurando establecer una red vtm con la menor longitud posible y tratando de conectar las concentraciones de árboles a cortar con el patio de acopio evitando el paso por áreas críticas (zonas de protección hídrica, áreas de protección por pendiente y áreas de producción con riesgo de erosión por la presencia de pendientes fuertes).

En dicho estudio se consideraron las siguientes operaciones:

**Operaciones productivas:**

- a) Traslado a un árbol de cortar: ubicación en el mapa y búsqueda del siguiente árbol a cortar
- b) Alistado del árbol: consiste en la limpieza de la vegetación alrededor del árbol para realizar en forma cómoda la corta del mismo.
- c) Corta: tiempo consumido durante el proceso de corta del árbol con la motosierra.
- d) Alistado para extracción: desrame, descopado, medición y troceado del fuste en trozas para su posterior extracción.
- e) Extracción: traslado de la troza de su posición resultante después de la caída del árbol a una posición adecuada sobre la vía de transporte menor para iniciar el arrastre. Normalmente se realizó utilizando un cable de 20 m.
- f) Trazado y construcción de la vía de transporte menor: esta operación involucró, para el caso de trazado a mano de las vtm, la planificación in situ de la red basado en la información del mapa base de aprovechamiento. En el diseño asistido por computadora solamente se trató de implementar la propuesta de trazado. En ambos casos dicha operación incluyó la construcción de la vía, mediante la corta y remoción de los obstáculos como árboles con un dap menor a 10 cm, árboles caídos y piedras.
- g) Arrastre: amarrado y traslado de las trazas desde donde queda el árbol después de la extracción hasta el patio.
- h) Soltado de la troza: liberación de la troza en el patio.
- i) Acomodo de la troza: acomodo de la troza en el patio
- j) Viaje vacío: regreso de la maquinaria al siguiente sitio de extracción.

**Operaciones no productivas:**

- a) Mantenimiento del tractor: reparaciones.
- b) Mantenimiento de la motosierra: afilado de motosierra, combustible, cambio de sable, reparaciones.
- c) Otras actividades: Almuerzo, tiempo para fumar, necesidades fisiológicas, descansos y conferencias técnicas.

A partir de este estudio y mediante un análisis de regresión múltiple se evaluó el efecto sobre el rendimiento en la extracción y el arrastre de los fustes, de un conjunto de variables inherentes al sitio:

- a) Pendiente de la vía de transporte menor
- b) Distancia de arrastre
- c) Volumen de la troza
- d) Largo de la troza
- e) Cantidad de metros de cable utilizados en la extracción
- f) Pendiente de extracción
- g) Angulo de caída del árbol
- h) Angulo de extracción

De este modo fue posible obtener las ecuaciones y parámetros necesarios para la construcción de una *superficie de fricción* que simulara adecuadamente el peso de las diferentes variables que afectan el rendimiento de la extracción y arrastre de los árboles de guácimo, en función de las características del sitio y el material a aprovechar.

La información topográfica e hídrica del bloque 2 con la cual se construyó dicha superficie de fricción fue proporcionada por la información digital con la cual FUNDECOR construyó el mapa base de aprovechamiento del área de estudio, con algunas correcciones.

Una vez generada la propuesta con el operador de distancia Pathway esta fue implementada durante el aprovechamiento del bloque 2. El desempeño de la misma se evaluó en términos del impacto producido al piso del bosque como por su efecto en el rendimiento de las diferentes operaciones realizadas durante el aprovechamiento.

El impacto al piso del bosque se estimó mediante un levantamiento topográfico de la red de vías de transporte menor construidas en ambos bloques, así como también de la cantidad de metros de cable utilizado en el aprovechamiento de cada uno de los árboles.

El efecto en el rendimiento se evaluó mediante una comparación del tiempo consumido por las operaciones arrastre y extracción durante el aprovechamiento realizado en cada uno de los bloques.

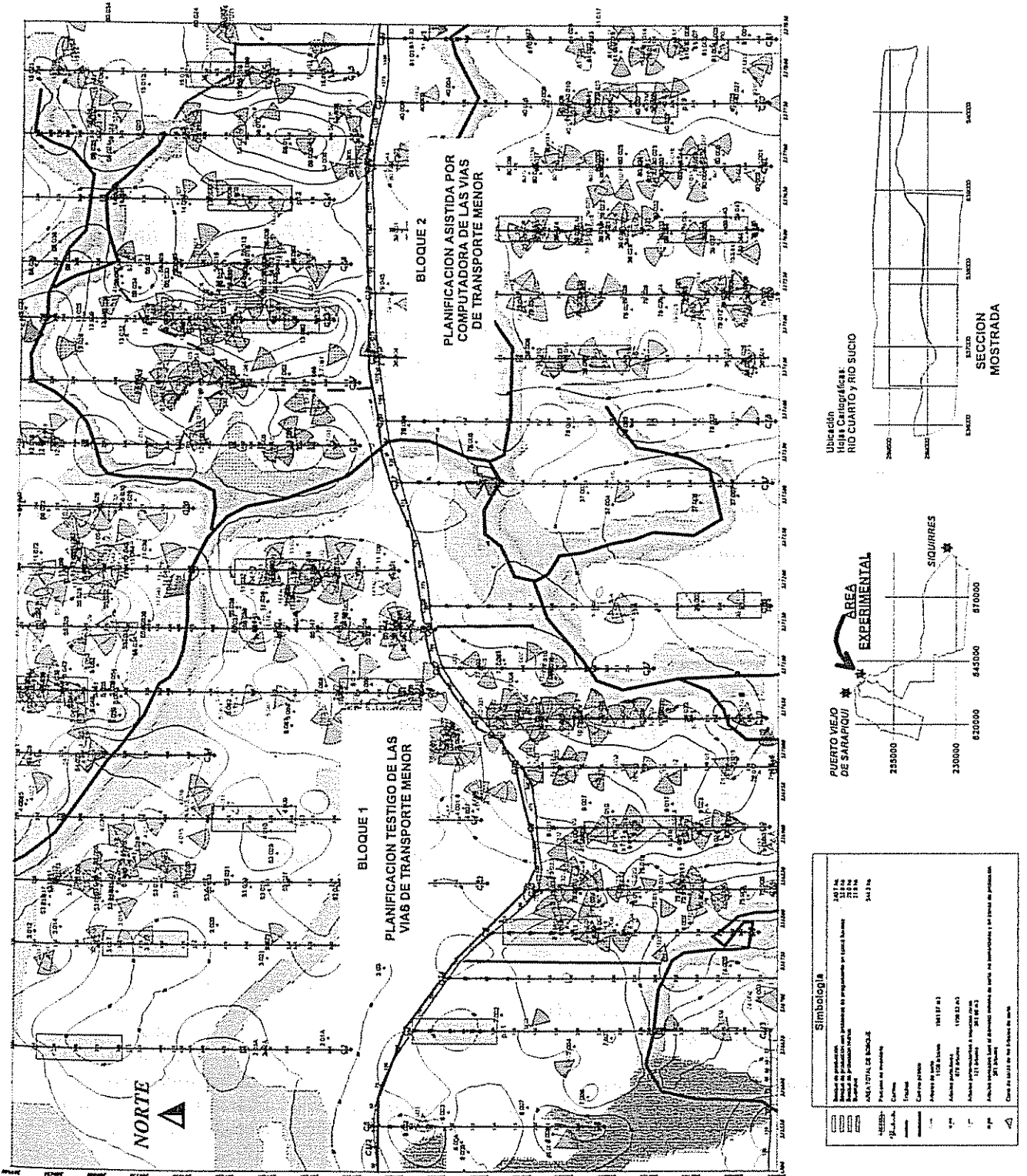
Dicha comparación se realizó mediante un análisis de covarianza para poder encontrar diferencias significativas en el desempeño de las redes de vías de transporte menor entre ambos bloques obviando posibles diferencias en peso y tamaño del material extraído así como también diferencias topográficas entre bloques de aprovechamiento que pudiesen afectar la comparación. En el mapa 3 se muestra la ubicación de los bloques de aprovechamiento evaluados.

#### **4.3 Elaboración del mapa base de aprovechamiento utilizado en el diseño de las vtm**

La identificación de las áreas críticas en el mapa base de aprovechamiento se realizó mediante la sobreposición de dos mapas base construidos a partir de información topográfica levantada sobre un sistema de carriles de muestreo sistemático establecido previamente en el área de estudio:

- Mapa hidrológico (ubicación de los drenajes permanente e intermitentes, quebradas, ríos y nacientes)
- Mapa de categorías de pendientes

Mapa 3: Ubicación de los bloques 1 y 2 de aprovechamiento en el área de estudio propiedad de la Familia Starke





Los carriles fueron establecidos cada 75 m y dispuestos como se muestra en la figura 5. Sobre dichos carriles y utilizando equipo forestal se levantó altimétrica y planimétricamente aspectos relevantes para la planificación del aprovechamiento forestal, como por ejemplo:

- ubicación de nacientes de agua
- drenajes permanentes e intermitentes
- ríos y quebradas
- caminos existentes
- uso actual
- ubicación de árboles a cortar, portadores<sup>1</sup> y remanentes<sup>2</sup>
- dirección de caída de los árboles a cortar

Utilizando esta información topográfica fue posible construir el mapa de categorías de pendientes a partir de un modelo de elevación digital interpolado con los datos de elevación de la propiedad. Dicha interpolación se realizó utilizando el método Ordinary Kriging y un modelo de semivariograma lineal isotrópico, con un sill igual a la varianza de los datos y sin efecto nugget (ver acápite 3.5.2).

El mapa hidrológico se trazó a mano con la ayuda de la información levantada en los carriles de inventario.

La sobreposición del mapa de pendientes sobre el hidrológico permitió identificar las áreas críticas siguiendo las pautas citadas en la figura 6. Estas pautas responden a los

---

<sup>1</sup>Un árbol portador es un individuo de una especie comercial que tiene una forma superior al promedio, una exposición de copa favorable y se encuentra en estado saludable para cumplir con la función de producción de semilla. La función de un árbol portador es producir semilla para inducir la regeneración de la especie en el rodal manejado.

<sup>2</sup>Un árbol remanente es aquel cuyo diámetro es mayor a los 60 cm pero no alcanza el diámetro mínimo de corta establecido en el plan silvicultural, o bien su especie en la actualidad no es comercializable a pesar de que por las dimensiones de su fuste se podría industrializar su madera.

lineamientos de protección del régimen hídrico establecidos en la ley y su reglamento forestal vigentes en Costa Rica<sup>3</sup> y así como también a disposiciones internas del Departamento de Operaciones de FUNDECOR.

Una vez ubicadas en un mapa estas áreas críticas, se añadieron al mismo la ubicación de los árboles a cortar<sup>4</sup> con su respectiva dirección de caída, ubicación de árboles portadores, a cortar y remanentes, además de las vías de extracción e infraestructura existente que pudiera ser utilizada durante la extracción.

El mapa con toda esta información es llamado mapa base o mapa de aprovechamiento y fue sobre el cual finalmente se realizó el trazado a mano de los caminos de extracción. Un ejemplo de este tipo de mapa se presenta en la figura 7.

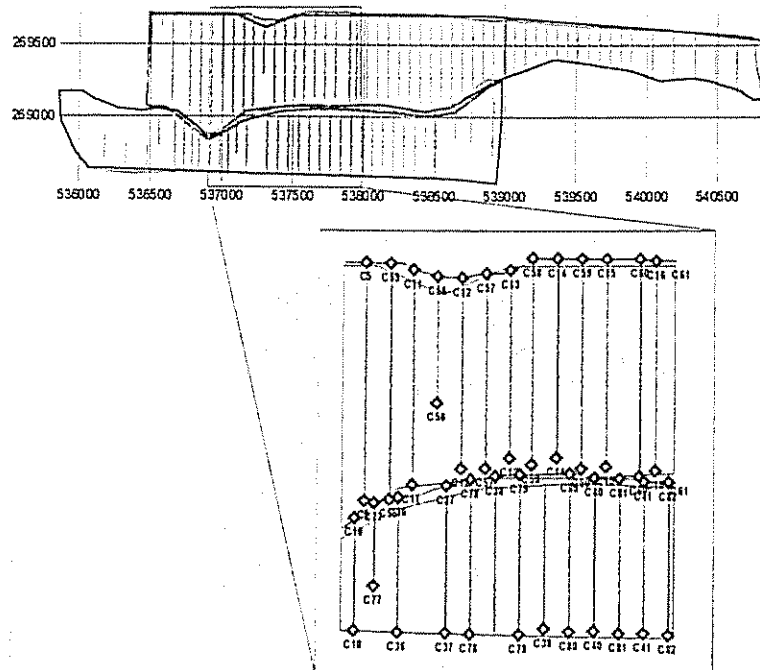


Figura 5: Sistema de carriles de inventario para el levantamiento planimétrico y altimétrico de accidentes topográficos y aspectos relevantes para el trazado de las vías de extracción en un aprovechamiento selectivo del bosque tropical en Sarapiquí, Heredia, Costa Rica

<sup>3</sup>Ley Forestal 7575 publicada en La Gaceta (72):1996 y su reglamento publicado en La Gaceta (16):1997.

<sup>4</sup>La selección de especies y de árboles a cortar siguen los lineamientos silviculturales establecidos en Aguilar y Muñoz (1994).

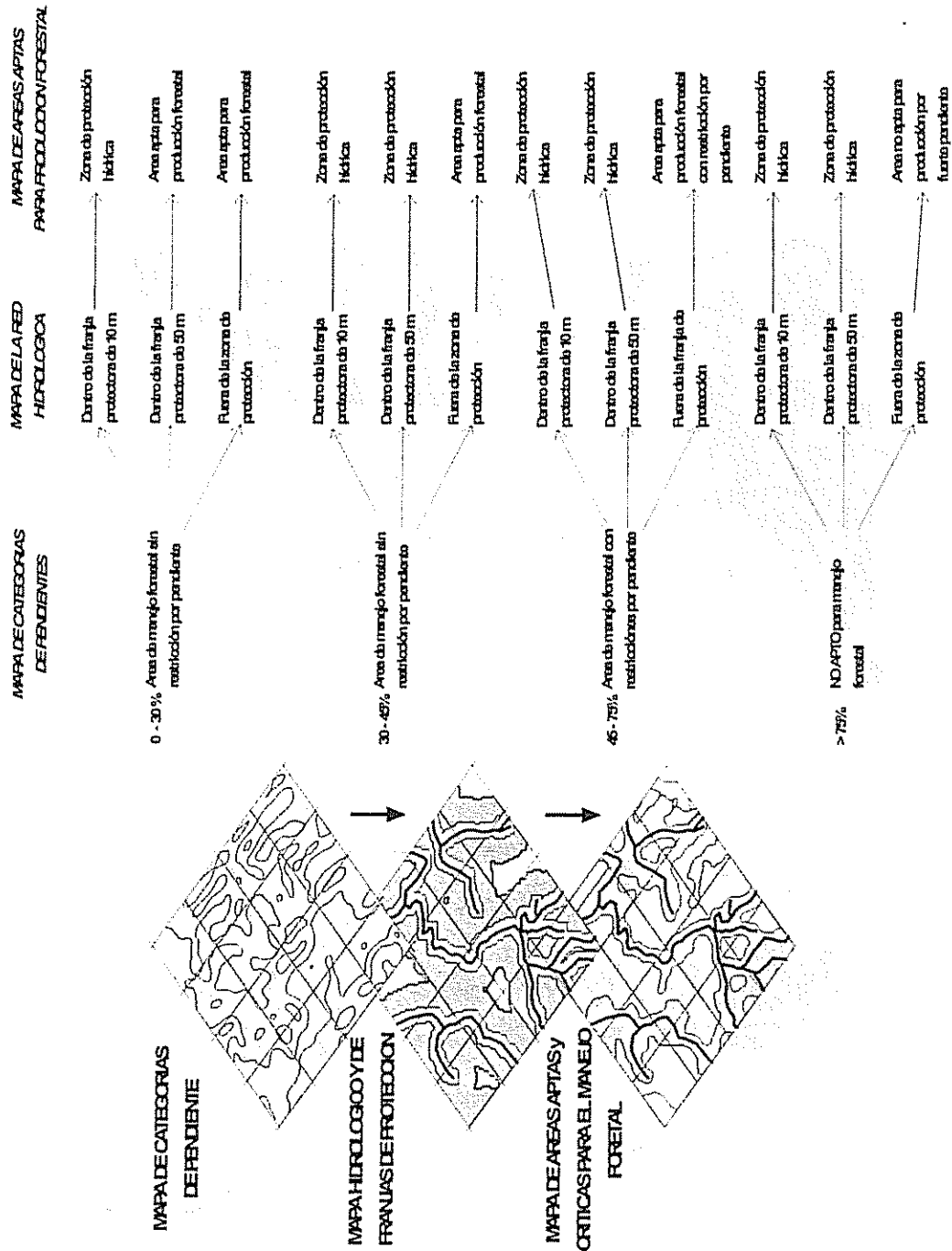


Figura 6 Diagrama de discriminación de áreas susceptibles a la erosión y aptas para aprovechamiento según los criterios utilizados por FUNDECOR y la legislación vigente en Costa Rica

<sup>4</sup>La selección de especies y de árboles a cortar siguen los lineamientos silviculturales establecidos en Aguilar y Muñoz (1994).

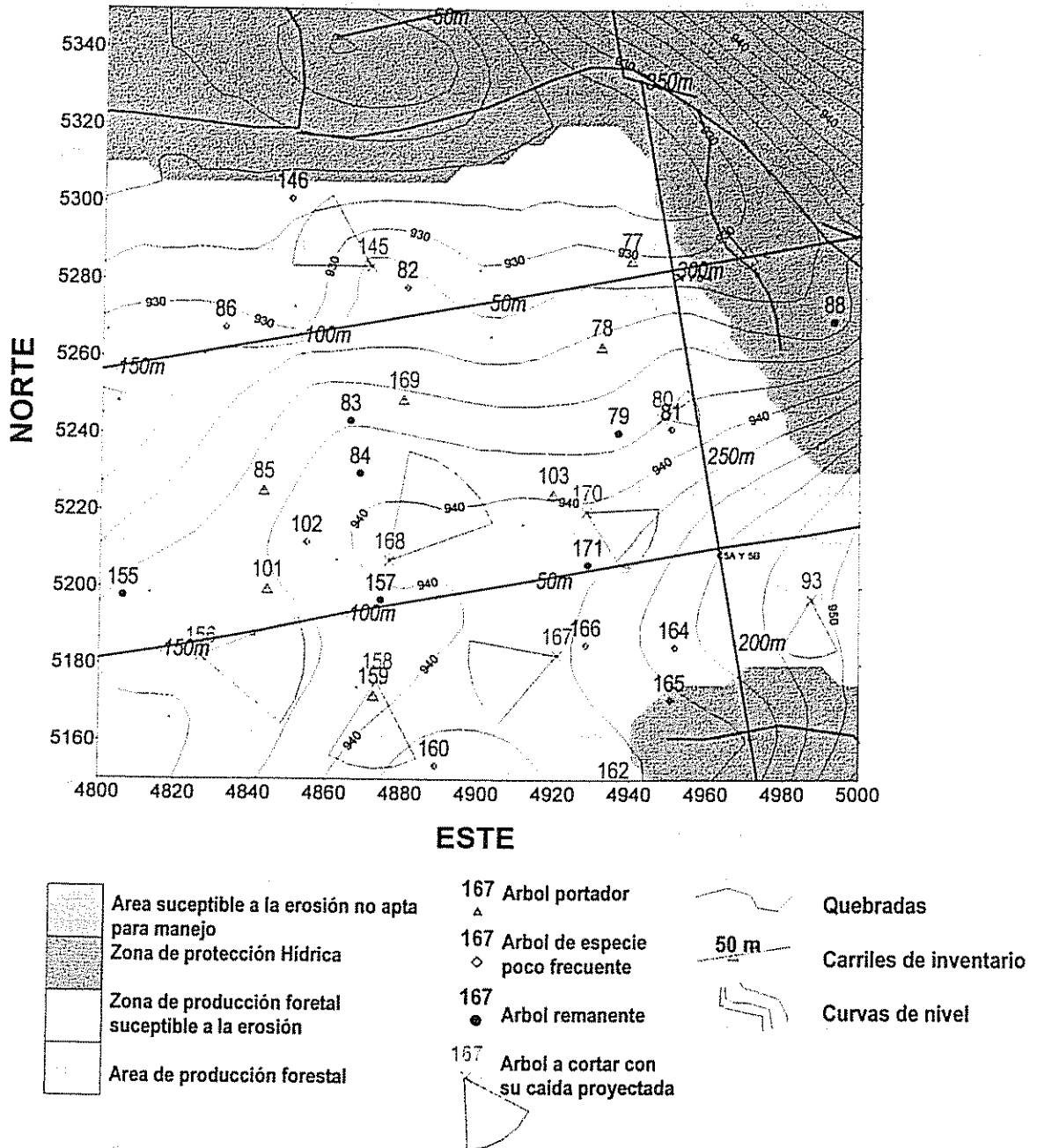


Figura 7 Detalle de un mapa base de aprovechamiento forestal listo para el trazado de caminos a mano.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSION

### 5.1 Características generales del aprovechamiento del guácimo (*Goethalsia meiantha*).

En el aprovechamiento de esta especie se empleó a un sierrero y un operador de tractor ambos con experiencia; trabajando en jornadas de nueve horas, utilizando una motosierra McCulloch 700, un tractor agrícola sencillo no equipado para labores forestales, y algunos accesorios como cadenas, ganchos y un cable de acero de 20 m para la extracción de fustes en lugares de difícil acceso.

El tamaño de la cuadrilla, el tipo de equipo y la maquinaria utilizada responden principalmente al reducido margen de utilidad del aprovechamiento del guácimo<sup>1</sup>, el cual no permite la utilización de maquinaria adaptada para tal actividad ni la incorporación de más personal

Por otra parte, las pequeñas dimensiones de las trozas y la calidad de la madera hacen que el aprovechamiento de esta especie sea rentable solamente utilizando maquinaria agrícola de bajo costo por hora, a pesar de las limitaciones en potencia y tracción que condicionan el uso de esta maquinaria a topografías y suelo favorables.

Este último aspecto se ilustra claramente en el cuadro 3; obsérvese que la pendiente promedio de las vías de transporte menor fue de apenas +3.6% en dirección de viaje cargado; así como también las dimensiones de las trozas arrastradas apenas alcanzaron un diámetro promedio en cara menor de 34.5 cm y 11 m de largo, para un volumen promedio por viaje de 1.44 m<sup>3</sup>.

Bajo estas condiciones el rendimiento fue de 8.63 m<sup>3</sup>\*h<sup>-1</sup> efectiva de madera puesta en patio de cargadero, el cual se encuentra por encima de los 6.62 m<sup>3</sup>\*h<sup>-1</sup> estimados por

---

<sup>1</sup> La madera de guácimo (*Goethalsia meiantha*), posee un peso específico básico de 0.35 (Carpio, 1992), es útil para la fabricación de paletas de helados y fósforos, y tiene un bajo precio en el mercado nacional (aproximadamente \$17.6/m<sup>3</sup> de madera en pie).

Rodríguez y Mayer (1984) para una distancia de arrastre de 180, en el aprovechamiento de un rodal de 32 años de *Pinus radiata* en la Cordillera de la Costa (Chile), utilizando tractores agrícolas y vías de transporte menor sin diseño previo.

Si bien la ecuación de rendimiento de dichos autores se ajustó con datos de madereo a una distancia máxima de arrastre de 70 m, la pendiente promedio (+5.85%) y el rango de volumen en la carga (entre 0.69 y 2.18 m<sup>3</sup>) son similares a los de este estudio.

**Cuadro 3** Condiciones generales de aprovechamiento de la especie guácimo (*Goethalsia meiantha*) para la fabricación de fósforos, en un bloque de aproximadamente 15 ha de bosque húmedo tropical intervenido. Sarapiquí, Costa Rica.

	Promedio	Intervalo de confianza		Mínimo	Máximo
		LI 95%	LS 95%		
Distancia de arrastre (m)	180	162	198	53	340
Pendiente media de las vías de arrastre (%) <sup>*</sup>	3.6	2.3	4.9	-6	19
Volumen promedio por carga (m <sup>3</sup> )	1.4418	1.2924	1.5912	0.5821	2.8482
Diámetro cara menor de las trozas arrastrados (cm)	34.5	33	36	25	51
Largo de las trozas arrastradas (m)	11	10	12	5	18

(\*) El signo de la pendiente está considerado en la dirección en la cual se realizó el viaje cargado.

### 5.1.2 Distribución del tiempo durante la jornada de trabajo.

El tiempo consumido por las diferentes operaciones de aprovechamiento fue evaluado mediante un registro continuo de inicio y final de cada labor, durante el aprovechamiento de 41 árboles de guácimo (*Goethalsia meiantha*), ubicados en un bloque de aproximadamente 15 ha de bosque tropical intervenido.

Un resumen de esta información se presenta en la figura 8 y cuadro 4, en los cuales se aprecia claramente que de una jornada promedio de 9 horas, un 22% del tiempo fue improductivo. Dicho porcentaje resultó elevado debido a frecuentes interrupciones por mantenimiento del equipo y maquinaria, posiblemente a causa del deterioro de la misma (ver figura 8).

En cuanto al restante 78% considerado como tiempo efectivo, más de la mitad (un 58%) fue consumido durante la extracción y el ciclo de arrastre de las trozas (viaje cargado, soltado y acomodo de la troza en patio y viaje vacío). Un 28% fue consumido por el ciclo de corta (búsqueda, alistado para cortar, corta y alistado para extracción del árbol) y el 14% restante se invirtió en el diseño y preparación de las vías de transporte menor.

Si bien esta distribución del tiempo efectivo es inherente al tipo de cuadrilla, maquinaria y equipo utilizado es importante considerar el nivel de planificación con que se ejecutaron estas actividades.

En la corta, la ubicación cuidadosa en el mapa y la debida identificación en el campo de los árboles a cortar, permitió invertir una menor cantidad de tiempo en la búsqueda de los mismos. Una vez ubicado el árbol, el tiempo invertido en el resto de las operaciones del ciclo de corta (alistado para cortar, corta y alistado para extracción), dependió de la experiencia y habilidad del operador de la motosierra.

En el caso de la extracción y el arrastre no se contó con un trazado previo de las vtm, lo que significa que antes de iniciar el aprovechamiento no se había realizado ninguna evaluación de diferentes alternativas de trazado. Por el contrario este se realizó in situ guiándose con la información proporcionada por el mapa base de aprovechamiento, conforme se fueron cortando los árboles.

La ausencia de una planificación más detallada de las vtm resulta particularmente preocupante, debido al efecto negativo que pudo tener esto en el rendimiento y en los costos de producción, más cuando las operaciones arrastre y extracción representan la mayor parte del costo total del aprovechamiento del guácimo.

Cabe resaltar que el alto consumo de recursos durante la extracción y el arrastre no solo se ha presentado en el aprovechamiento del guácimo. De igual forma ha sucedido en los

aprovechamientos tradicionales según consta en un estudio realizado por Carrera (1993), en un bosque ubicado en Río Corinto de Guápiles cerca del área de estudio, donde el transporte menor representó el 59% del costo total del aprovechamiento, incluyendo labores pre y post-aprovechamiento. Por otra parte en un estudio realizado por Méndez (1997), en la zona de San Carlos, el porcentaje resultó ser de un 28.8%, sin considerar el salario del operador del tractor y su ayudante.

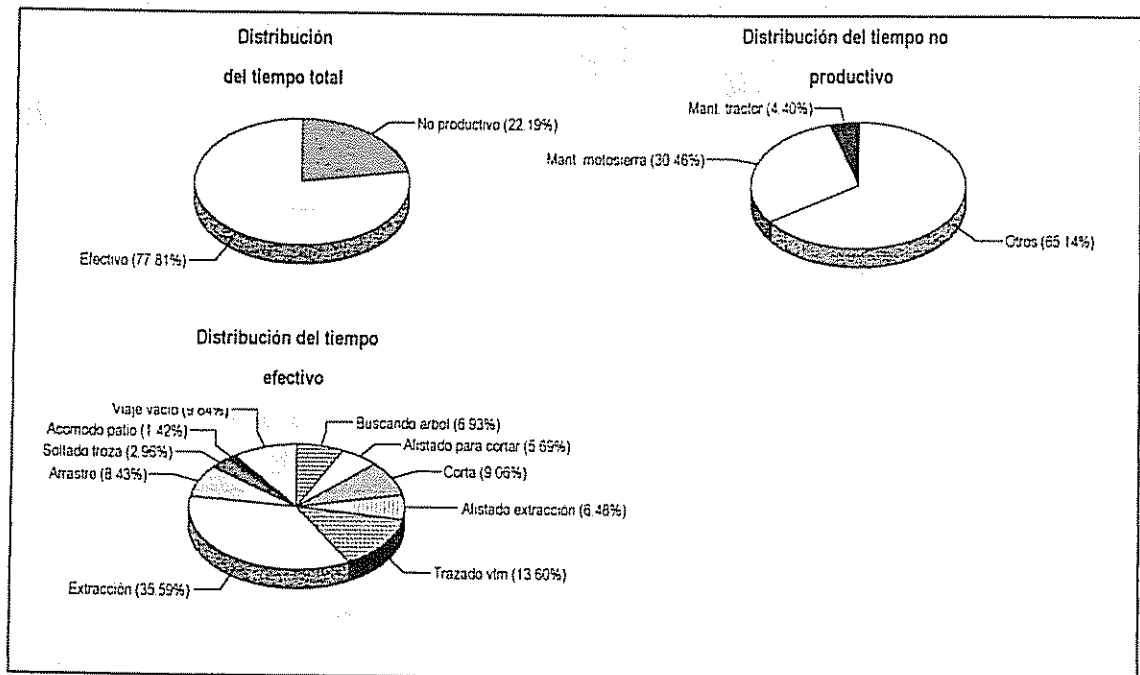


Figura 8: Distribución del tiempo total invertido en las operaciones de aprovechamiento forestal hasta la colocación de la madera en el patio de acopio, utilizando un diseño manual de vías de transporte menor. La información se obtuvo mediante un estudio continuo de consumo de tiempo por actividad en un bosque tropical intervenido, donde solamente se aprovechó la especie *Goethalsia meiantha* (Guácimo), árbol de madera liviana utilizado en la fabricación de fósforos. Sarapiquí, Costa Rica.



**Cuadro 4** Rendimiento observado durante el aprovechamiento de 41 árboles de guácimo (*Goethalsia meiantha*) en un bosque húmedo tropical intervenido de topografía plana, con una cuadrilla de 2 personas, utilizando un tractor agrícola sencillo. Sarapiquí, Costa Rica.

Jornada	Duración hr	Volumen puesto en patio Por jornada m <sup>3</sup>	Arboles puestos en patio por Jornada	Dimensiones promedio de los fustes		Productividad	
				Largo m	Diámetro <sup>1</sup> cm	Volumen m <sup>3</sup> /hr	Arboles Árbs/hr
1	9.90	18.54	11	11.07	33.39	1.87	1.11
2	7.18	13.73	8	8.36	34.93	1.91	1.11
3	10.05	18.39	10	11.44	35.75	1.83	0.99
4	8.45	15.51	10	11.36	33.71	1.84	1.18
5	9.34	21.56	11	13.92	34.62	2.31	1.18
Promedio	8.98	17.546	10	11.23	34.48	1.95	1.12

<sup>1</sup> Diámetro en cara menor

- \* El rendimiento comprende todas las operaciones ejecutadas entre la corta hasta el acomodo de trozas en el patio de acopio
- \*\* Los rendimientos corresponden al aprovechamiento realizado en el bloque 1. con diseño manual de vías de vías de transporte

## 5.2 Pautas a seguir en el diseño de las vías de transporte menor para el aprovechamiento del guácimo.

La planificación de las vtm bajo la modalidad de aprovechamiento de impacto reducido, es un proceso basado en un juego de recomendaciones válidas en una amplia gama de condiciones y sistemas de aprovechamiento<sup>2</sup>. Sin embargo para cada condición en particular estos supuestos y recomendaciones pueden afectar positiva o negativamente el rendimiento de la extracción y el arrastre.

A continuación se presentan los resultados de un análisis donde se evalúan el uso del cable en la extracción y el efecto de distancia de arrastre y pendiente en el trazado de las vías de transporte menor.

<sup>2</sup> Ver sección 3.4 en este documento

### 5.2.1 Pautas a seguir en el arrastre:

Dos aspectos que se recomienda minimizar en el diseño de las vtm son la longitud total y la pendiente promedio de la vtm. Ambos además de incidir en el impacto del aprovechamiento, también afectan el rendimiento del arrastre.

Dicho efecto fue evaluado mediante un análisis de regresión múltiple en el cual también se incluyeron como variables independientes el volumen y el largo de la troza arrastrada. En el cuadro 5 se presentan algunas estadísticas descriptivas de las variables analizadas y en el cuadro 6 un resumen de los resultados del análisis.

Como se esperaba, la distancia de arrastre y la pendiente promedio de la vtm afectaron significativamente el tiempo consumido en el arrastre. Sin embargo resultó interesante la forma en que dichas variables afectaron el rendimiento:

- a. La pendiente de la vtm fue la variable con el mayor efecto sobre el consumo de tiempo en el arrastre, dado que esta explicó un 45.34% de la variación total de  $Y$ , y la distancia de arrastre un 35.5%.
- b. Lo anterior se aprecia claramente en la figura 9, donde la curva de tiempo consumido para una distancia de arrastre constante, crece más rápido que la curva de tiempo para una pendiente constante, además de que la primera está desplazada hacia arriba.
- c. El modelo de regresión ajustado (ecuación 19) presenta una variación exponencial tanto en el eje  $yx$  como en eje  $yz$ . Si bien se utilizó una técnica de regresión lineal y se obtuvo un modelo no-lineal por cuanto fue necesario transformar la variable dependiente para así poder cumplir con el supuesto de normalidad de los residuos y para que así las pruebas de  $t$  de los coeficientes fuesen válidas.

Otro aspecto importante de anotar acerca del modelo ajustado es que el mismo se indefine cuando la expresión dentro de la raíz es igual o menor a cero. Por lo tanto esta ecuación no tiene solución cuando la pendiente (z) y la distancia de arrastre (x) toman los valores generados por las ecuaciones 20 y 21

$$f(y) = (a + bx + cz)^{-2} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$x \leq \frac{-a - cz}{b} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$z \leq \frac{-a - bx}{c} \quad \text{Ecuación 21}$$

Sin embargo, dado que el modelo representa a una función cóncava hacia arriba, tanto en el eje  $yx$ , como en el  $yz$ , en el intervalo  $[0, +\infty[$ , por cuanto su segunda derivada  $f''(y)$  siempre es mayor a cero, tanto respecto a  $x$  como a  $z$ , como puede apreciarse en las ecuaciones 22 y 23.

$$f''(y) = \frac{6c^2}{(a + bx + cz)^4} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$f''(y) = \frac{6b^2}{(a + bx + cz)^4} \quad \text{Ecuación 23}$$

Se puede decir entonces que al menos en el rango<sup>3</sup> en el cual las variables fueron ajustadas, la función explica en una forma lógica la variación del tiempo consumido por el arrastre con respecto a la distancia y la pendiente de la vtm.

En conclusión al parecer la pendiente tiene un efecto negativo tanto en términos de impacto del aprovechamiento como en el rendimiento del arrastre. Esto por cuanto a mayor pendiente promedio de la vtm, mayor será la erosión en la misma y de acuerdo al análisis anterior una mayor cantidad de tiempo consumido durante el arrastre de los fustes.

<sup>3</sup> [0 %, 10 %] en eje x (pendiente promedio), [38 m ,270 m] en el eje z (distancia promedio de arrastre)

En el caso de la distancia de arrastre parece darse la misma situación: a mayor distancia mayor cantidad de área de piso del bosque perturbado, y por consiguiente una mayor cantidad de tiempo consumido durante el arrastre.

Sin embargo a la hora de diseñar las vtm debe presentarse especial importancia al mayor efecto de la pendiente sobre el rendimiento, y posiblemente también sobre la cantidad de sedimento producto de la erosión en las vtm. En otras palabras, antes de minimizar distancia podría ser más importante minimizar la pendiente promedio de la vtm aún en cuanto control de erosión se refiere.

**Cuadro 5** Estadísticas descriptivas de las variables incluidas en el análisis de regresión múltiple realizado para la identificación de variables que afectan el rendimiento en la operación arrastre utilizando un tractor de llantas agrícola sencillo en el aprovechamiento del guácimo (*Goethalsia meiantha*).

Código	Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	Rango	Número de observaciones
x	Largo del fuste (m)	5.00	17.77	11.28	12.77	51
w	Volumen arrastrado por ciclo (m <sup>3</sup> )	0.5821	2.8482	1.4418	2.2661	51
v	Distancia de arrastre (m)	38.21	272.60	148.54	234.39	51
u	Pendiente promedio sin signo de la vtm (%)	0.8%	9.7%	3.1%	8.9%	51
y	Tiempo consumido cargado (minutos)	1.20	31.32	4.56	30.12	51

**Cuadro 6** Resumen de resultados del análisis de regresión múltiple para la operación arrastre (viaje cargado), considerando un juego de 51 observaciones de tiempo consumido por un tractor agrícola sencillo.

Modelo	Coeficiente		p( F >t <sub>α/2</sub> ) ó p( t >F <sub>α/2</sub> )	Decisión (5%) Ho: β=0	Poder (5%)	R <sup>2</sup> Del modelo e individual	Normalidad de los residuos		
							Prueba	Prob	Ho : Los residuos son normales
<b>Ecuación 24</b>	<b>Modelo</b>		0.000000	Rechazada	0.860170	0.57037	Skewness	0.601	Acceptada Ho
	a	0.9610005	0.000000	Rechazada	1.000000		Kurtosis	0.670	Acceptada Ho
	bv	-1.623028E-03	0.000008	Rechazada	0.998486	0.144527	Omnibus	0.796	Acceptada Ho
	cu	-5.153437	0.000000	Rechazada	0.999978	0.356397			
	dw	4.113548E-02	0.378989	Aceptada	0.140166	0.000128			
<b>Ecuación 25</b>	<b>Modelo</b>		0.000000	Rechazada	0.998925	0.56259	Skewness	0.676	Acceptada Ho
	a	0.9776125	0.000000	Rechazada	1.000000		Kurtosis	0.578	Acceptada Ho
	bv	-1.51796E-03	0.000005	Rechazada	0.998870	0.094248	Omnibus	0.785	Acceptada Ho
	cu	-5.319808	0.000000	Rechazada	1.000000	0.468339			

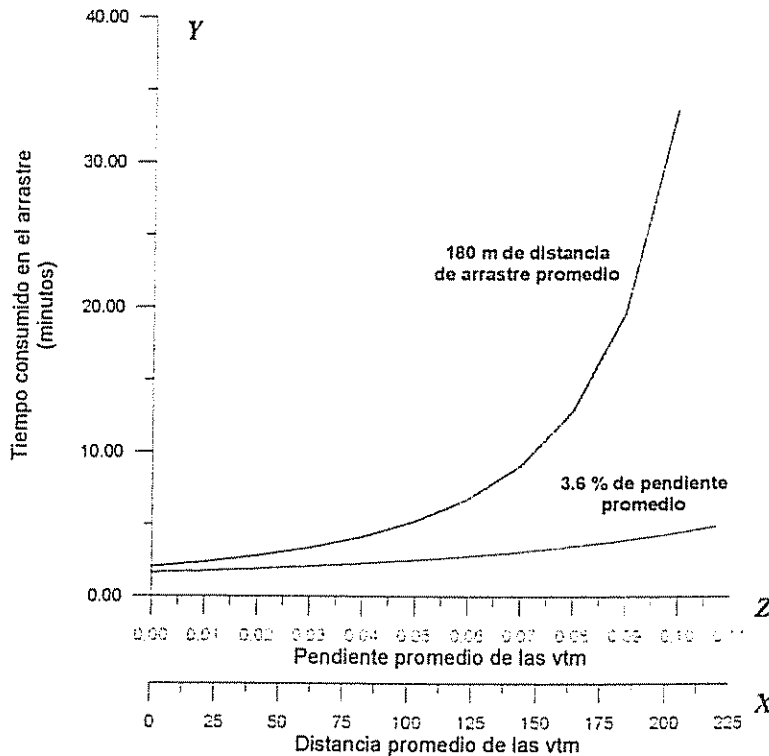
v: distancia de arrastre u: pendiente de la vía de transporte menor; w: volumen de la troza; x: largo de la troza

$$\frac{1}{\sqrt{y}} = a + bv + cu + dw + ex$$

Ecuación 24

$$\frac{1}{\sqrt{y}} = a + bv + cu$$

Ecuación 25



**Figura 9:** Curvas de tiempo consumido en el arrastre contra pendiente promedio y longitud de las vtm. Obsérvese que ambas curvas son exponenciales, siendo la curva de distancia promedio constante la de mayor pendiente. Esto indica un mayor efecto de la pendiente sobre tiempo consumido durante esta operación.

Por otra parte, si bien de acuerdo al análisis realizado tanto el volumen arrastrado como el largo del fuste no influyeron significativamente en el tiempo consumido durante el arrastre, esto resulta particularmente interesante, más cuando lo lógico sería que a mayor volumen y longitud más pesada y difícil de manipular sería la troza arrastrada y por lo tanto un mayor tiempo debió ser consumido en su traslado.

Una posible explicación de lo anterior puede estar relacionada con la amplitud de los rangos muestreados en estas variables. Dichos rangos posiblemente no fueron lo suficientemente amplios debido a la uniformidad de los árboles aprovechados, produciéndose la presencia de multicolinealidad<sup>4</sup> en los datos (ver cuadros 3 y 5).

Situación que por lo general produce estimaciones imprecisas y un aumento del error estándar de los coeficientes de regresión, disminución del valor de la prueba parcial de t, valores falsos no significativos de  $p(|t| > t_{\alpha/2})$ , y desmejora de la capacidad de predicción del modelo (Hintze, 1997).

Sin embargo en ninguna de las diferentes pruebas realizadas para detectar dicha multicolinealidad, esta resultó ser un problema. Ante esta incertidumbre se prefirió descartar ambas variables de la ecuación de regresión, con lo cual se obtuvo un modelo más sencillo con ajuste y significancia similar al anterior (ver ecuación 25 y cuadro 6).

---

<sup>4</sup> Traducción libre del autor de la palabra "multicollinearity".

### 5.2.2 Pautas a seguir en la extracción:

Entre las recomendaciones que generalmente se encuentran en la literatura dirigidas a minimizar el impacto y facilitar la extracción se mencionan la corta dirigida y el uso del cable en la extracción de los fustes.

Con relación a la corta dirigida, de acuerdo a Dysktra y Heinrich (1996), al cortar un árbol su dirección de caída debe procurar que forme un ángulo agudo con la dirección de arrastre para así facilitar su extracción. Dicho ángulo se denominó en este estudio como ángulo de caída  $-AC-$  (ver figura 10) y según los citados autores el óptimo de dicho ángulo está entre  $35^\circ$  y  $45^\circ$ .

Una vez cortado el árbol, este fue extraído utilizando el cable. El ángulo formado el cable y la dirección de arrastre se denominó en este estudio como ángulo de extracción  $-AE-$  (ver figura 10).

En la literatura se recomienda el uso de dicho cable ya que evita el tránsito de la maquinaria hasta el tocón de los árboles, reduciendo así la longitud total de vtm. Sin embargo se evaluó el efecto del uso de dicho cable sobre el rendimiento en la extracción, mediante un análisis de regresión múltiple en el que se incluyeron las variables  $AC$  y  $AE$ , además de otras cuatro que se supone complementaron el análisis: largo y volumen de la troza ( $LT$  y  $VT$ ), longitud y pendiente de la línea de extracción ( $LE$  y  $PLE$ ). Las estadísticas descriptivas de estas variables se presentan en el cuadro 7; los resultados del análisis en el cuadro 8.

En dicho análisis resultaron significativas solamente las variables  $AC$  y  $LE$ . El resto de la mismas no afectaron significativamente el rendimiento a un  $\alpha=0.05$ . Nuevamente se sospecha que la variable  $VT$  no ingreso al modelo debido a lo restringido del rango evaluado.

Debido a lo anterior se ajustó un nuevo modelo de regresión con solamente estas dos variables. En este nuevo modelo *LE* fue la variable con el mayor efecto sobre el rendimiento, dado que explico un 58% de la variación total de *Y*, y por su parte *AC* explico solamente un 15% (ver cuadro 8).

Por otra parte, el coeficiente calculado para *LE* fue positivo, indicando que conforme dicha variable aumenta el tiempo consumido en la extracción aumenta, lo cual es completamente lógico.

Fue el comportamiento de la variable *AC* el que resultó contrario a lo esperado. El coeficiente de esta variable fue negativo, indicando que conforme el ángulo de caída es más abierto, el tiempo consumido durante la extracción fue menor.

Esta incongruencia podría estar asociada a la forma en que se realizó la extracción. Donde dependiendo de la combinación de ángulos de extracción y caída el fuste debía girar una o dos veces para salir a la vtm, consumiendo así mayor o menor tiempo en la extracción dada la resistencia de la vegetación circundante al giro de la troza.

Cuadro 7 Estadísticas descriptivas de las variables incluidas en el análisis de regresión múltiple realizado para la identificación de variables que afectan el rendimiento en la operación extracción utilizando un tractor de llantas agrícola sencillo, en el aprovechamiento del guácimo (*Goethalsia meiantha*).

Código	Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	Rango	Número de observaciones
<i>LT</i>	Largo del fuste (m)	6	19.8	12.3	13.8	36
<i>VT</i>	Volumen arrastrado por ciclo (m <sup>3</sup> )	0.6257	2.8482	1.5825	2.2225	36
<i>LE</i>	Longitud de la línea de extracción (m)	0	30.8	11.4	30.8	36
<i>PLE</i>	Pendiente de la extracción (%) <sup>1</sup>	-2%	22.8%	6.5%	24.8%	36
<i>AE</i>	Angulo de extracción (°) <sup>2</sup>	0.95	114.5	39.0	113.6	36
<i>AC</i>	Angulo caída (°) <sup>3</sup>	1	224	55.2	223	36
<i>y</i>	Tiempo consumido por árbol (minutos)	0.6	40.2	12.7	39.6	36

<sup>1</sup> pendiente evaluada en dirección de la extracción

<sup>2</sup> ángulo formado entre la dirección de extracción y la dirección de arrastre (ver figura 10)

<sup>3</sup> ángulo formado entre la dirección de caída y la dirección de arrastre (ver figura 10)



Por ejemplo, si un fuste caía perpendicularmente a la vía de transporte menor, dependiendo del ángulo de extracción, el mismo solo tenía que girar al salir a la vtm. Mientras que si el fuste se encontraba paralelo o bien formando un ángulo agudo con la vtm, este debía girar dos veces si se realizaba la extracción en ángulo recto; en este caso el fuste realizaba un giro al alinearse en la dirección de extracción y otro al alinearse en dirección del arrastre.

De acuerdo a lo anterior, una posible explicación de que en este caso se produjera el efecto contrario al esperado responde al hecho de que el rango de combinaciones de ángulos de caída y extracción no fue equitativamente muestreado.

Ante esta incertidumbre, para descartar el efecto positivo de la dirección de caída en el rendimiento de la extracción se considera necesario la realización de una prueba con diseño experimental para corroborar el resultado de este análisis.

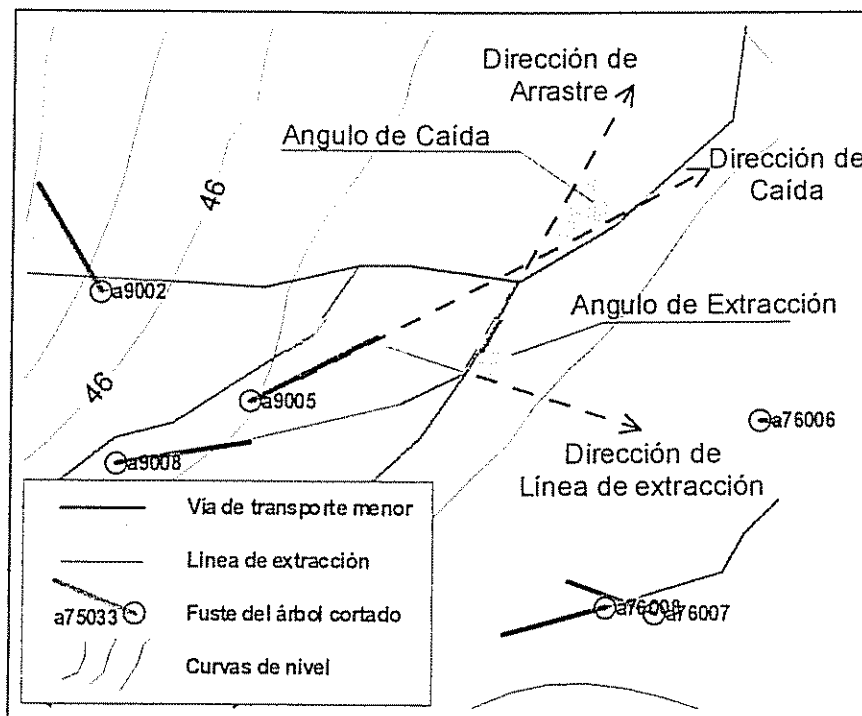


Figura 10: Angulo de extracción y ángulo de caída

Finalmente, si bien el uso del cable disminuye el impacto en el piso del bosque, de acuerdo a estos resultados dicha recomendación afecta negativamente el rendimiento en la extracción. Esta práctica obligó al maderero a invertir una mayor cantidad de tiempo en la operación, exactamente 0.69 minutos más por cada metro de cable que tuvo que utilizar.

En cuanto la corta dirigida, si bien en este estudio no pudo establecer exactamente cual es su efecto sobre el rendimiento de la extracción, lo lógico de esperar es que se produzca un costo extra al implementar esta medida, especialmente al tener que invertir una mayor cantidad de tiempo en el control de la caída de los árboles.

**Cuadro 8** Resumen de resultados del análisis de regresión múltiple para la operación extracción, considerando un juego de 36 observaciones de tiempo consumido por un tractor agrícola sencillo.

Modelo	Coeficiente	p( t >t <sub>α,n</sub> ) o p( F >F <sub>α,n</sub> )	Decisión (5%) Ho: β=0	Poder (5%)	R <sup>2</sup> Del modelo e individual	Normalidad de los residuos		
						Prueba	Prob	Ho : Los residuos son normales
<b>Ecuación 8</b>	<u>Modelo</u>	0.000043	Rechazada	0.373995	0.619801	Skewness	0.201	Acceptada Ho
LT	a 6.545371	0.249974	Aceptada	0.058734	0.026102	Kurtosis	0.520	Acceptada Ho
VT	b -0.4653127	0.385232	Aceptada	0.050006		Omnibus	0.360	Acceptada Ho
LE	c 3.852718	0.304037	Aceptada	0.120805				
PLE	d 0.5947908	0.001580	Rechazada	0.396152		0.295330		
AE	e -6.236506	0.805514	Aceptada	0.910873		0.002125		
AC	f 3.276856E-02	0.482252	Aceptada	0.079366		0.017173		
	g -4.739578E-02	0.117695	Aceptada	0.052695		0.082278		
<b>Ecuación 9</b>	<u>Modelo</u>	0.000000	Rechazada	0.992119	0.596821	Skewness	0.324	Acceptada Ho
LE	a 7.519324	0.000294	Rechazada	0.975440	0.557752	Kurtosis	0.930	Acceptada Ho
	b 0.6916713	0.000000	Rechazada	0.999998		Omnibus	0.612	Acceptada Ho
AC	c -4.801097E-02	0.022219	Rechazada	0.644072		0.070347		

LT: longitud de la troza; VT: volumen de la troza; LE: Longitud de la línea de extracción; PLE: Pendiente de la línea de extracción; AE: Angulo de extracción; AC: Angulo de caída

$$y = a + bLT + cVT + dLE + ePLE + fAE + gAC$$

Ecuación 26

$$y = a + bLE + cAC$$

Ecuación 27

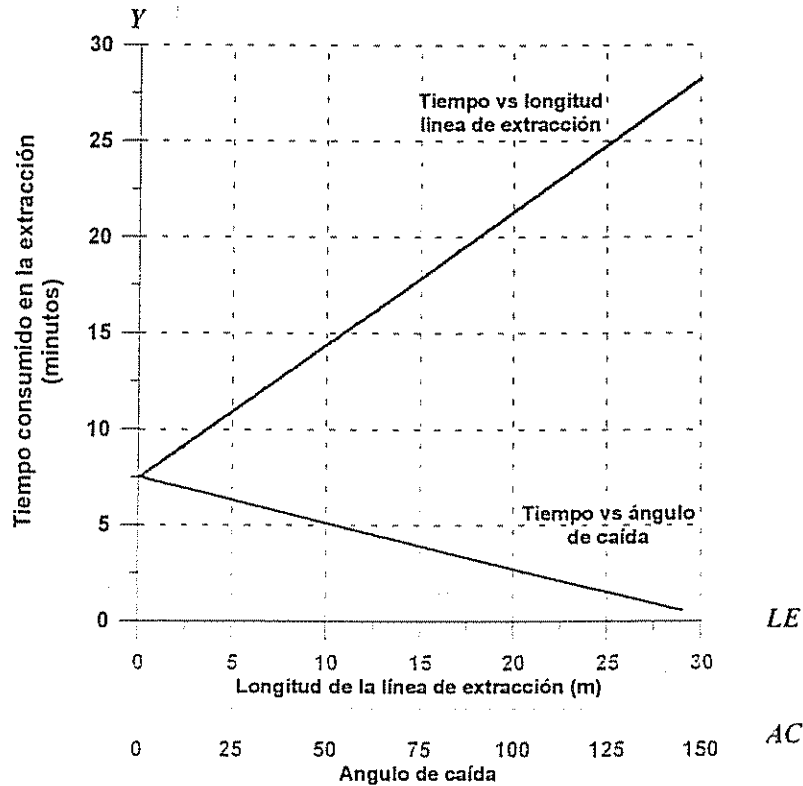


Figura 11: Variación del tiempo consumido durante la extracción con respecto a la longitud de la línea de extracción y al ángulo de caída.

### 5.3 Aplicación del diseño de vías de transporte menor asistido por computadora

#### 5.3.1 Corrección del mapa base de aprovechamiento:

De acuerdo a lo expuesto en el apartado anterior (5.2), el rendimiento de las operaciones arrastre y extracción es afectado básicamente por dos factores: la pendiente promedio de la vtm, y el uso del cable en la extracción de los fustes. En menor grado afectan la distancia de arrastre y la dirección de caída de los árboles.

Por tal razón, para poder planificar adecuadamente las vtm en el aprovechamiento del guácimo, resulta imprescindible que tanto la información de pendientes como la de ubicación de los árboles a cortar sea levantada en forma exacta.

Debido a que el mapa base de aprovechamiento del área experimental estaba basado en un levantamiento topográfico no corregido, se procedió entonces a reubicar los diferentes aspectos relevantes para el posterior trazado de las vtm asistido por computadora.

Utilizando equipo forestal<sup>5</sup> se realizó un nuevo levantamiento del área con el debido cierre angular y de distancia, en cual se construyeron tres poligonales cerradas con un bajo error de cierre angular y un moderado error en distancia (ver cuadro 9 y figura 12).

**Cuadro 9. Error de cierre del levantamiento corregido del bloque 2 del área experimental.**

<b>Poligonal</b>	<b>Error de cierre angular</b>	<b>Error de cierre en distancia</b>	<b>Area de la poligonal cerrada</b>
<b>Carriles de inventario 12 y 13</b>	0° 0' 0"	1m / 423 m	4.1868 ha
<b>Carriles de inventario 14 y 58</b>	0° 10' 48"	1m / 907 m	1.3734 ha
<b>Carriles de inventario 15 y 59</b>	0° 0' 0"	1m / 430 m	0.9967 ha

Una vez corregido el levantamiento, este se sobrepuso al original evidenciando la presencia de errores en la ubicación de los carriles de inventario, lo cual indudablemente afectó la precisión del MED en el bloque 2 del área experimental.

Esta situación se aprecia claramente al comparar los modelos de elevación digital de las figuras 12B y 12C. Si bien ambos modelos presentan una forma similar, los cambios de elevación en el modelo sin corregir presentan una mayor variación en la elevación.

Ante esta situación se procedió a estimar la elevación de un mismo grupo de datos (x,y) tanto con el MED 1 construido con los datos sin corregir y como con el MED 2 construido con los datos de las poligonales corregidas, para luego realizar una prueba pareada de  $t^6$ .

<sup>5</sup> Cinta métrica convencional, brújula y clinómetro marca SUUNTO.

En dicha prueba se rechazó  $H_0: \hat{Y}_{MED 1} = \hat{Y}_{MED 2}$ , con una  $p(|t| > t_{0.05/2}) = 0.001365$  y un  $n=93$ , donde en el MED 1 construido con los datos sin corregir en general sobrestimó la elevación.

De acuerdo a este resultado, la calidad del levantamiento topográfico incidió significativamente en la precisión del MED, hecho que resulta importante tomarlo en cuenta a la hora de levantar la información topográfica necesaria para elaborar el mapa base de aprovechamiento.

Por otra parte la sobrestimación y la variación pronunciada de la elevación sugieren que los errores en el levantamiento topográfico pueden incidir también en la precisión de las mapas de pendientes construidos a partir de la estimación de la diferencias de elevación en el modelo de elevación digital.

---

<sup>6</sup> En dicha comparación ambos MED fueron interpolados con la misma técnica Kriging, utilizando un semivariograma isotrópico lineal.

### 5.3.2 Construcción del modelo de elevación digital del bloque 2.

Para la construcción de un MED existen varias técnicas de interpolación, sin embargo como ya se mencionó en el apartado 3.5.2, la técnica Kriging ha probado ser superior en muchos campos.

Por otra parte, dado que este método depende del cálculo de un semivariograma preciso, se ajustó un semivariograma experimental con los datos de elevación del bloque 2 debidamente corregidos. Los resultados de dicho análisis se presentan a continuación.

#### 5.3.2.1 Ajuste del semivariograma experimental.

Utilizando un programa especialmente diseñado para este propósito<sup>7</sup> se calculó la semivarianza anisotrópica en las direcciones 0° y 90°, y con un lag de 46 m, para luego plotear los datos con respecto a la distancia entre puntos.

Una vez graficada la información se buscó el modelo de mejor ajuste obteniéndose un semivariograma esférico de variación anisotrópica (0.74), con efecto nugget de 0.6997 m<sup>2</sup>, un rango de 102.3893 m y un sill de 10 m<sup>2</sup> (ver figura 13):

$$\gamma(h) = 0.6997 + 10 \left\{ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right\} \quad \text{si } 0 < a < h$$

Ecuación 28

$$\gamma(h) = 10.6997 \quad \text{si } h > a$$

Donde:  $h$  = la distancia entre puntos de elevación y

$$a = \left\{ (102.4 * 0.74)^2 \cos^2(\theta - 19) + (102.4)^2 \sin^2(\theta - 19) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 29

Donde  $\theta$  es el acimut del vector  $h$ .

<sup>7</sup> VARIOWIN 2.2 demo version. Programa para el análisis espacial de datos en dos dimensiones desarrollado por Y. Pannatier. La guía de usuario se encuentra en: Pannatier, Y., VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D, Springer-Verlag, New York, NY, 1996.

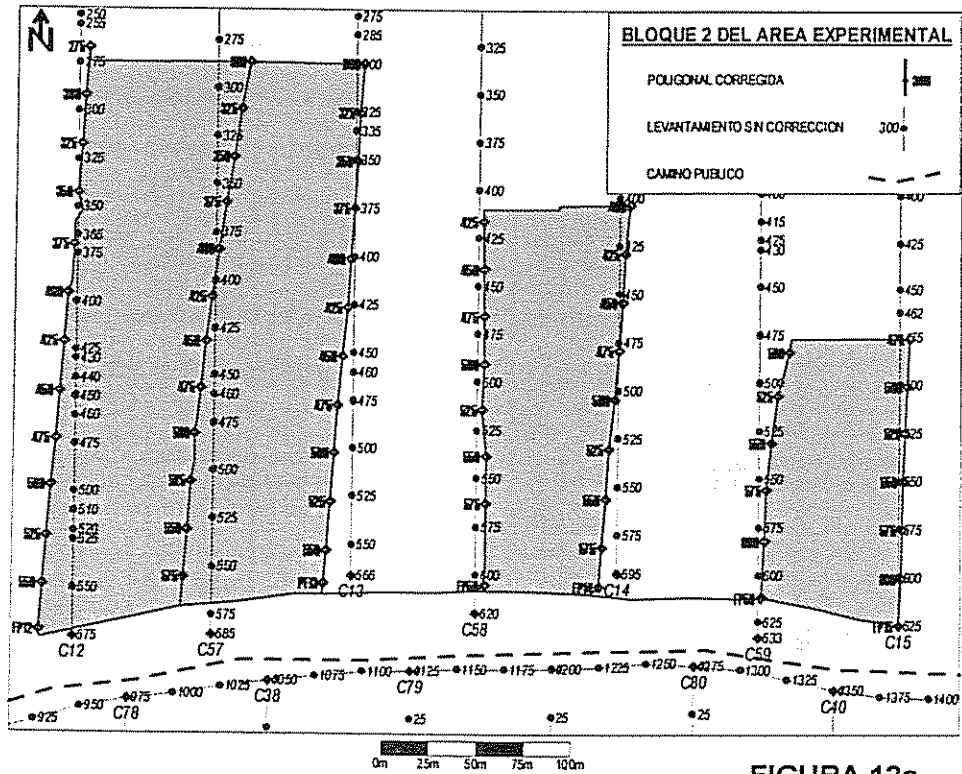
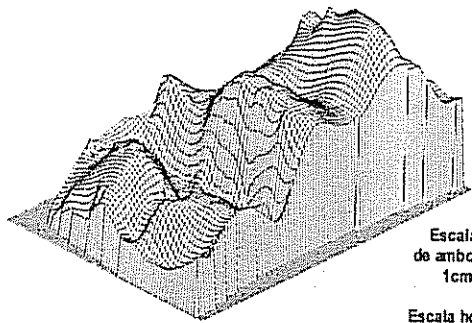
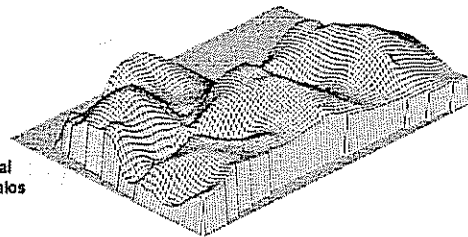


FIGURA 12a



Modelo de elevación digital  
con el levantamiento topográfico sin corrección  
FIGURA 12b



Modelo de elevación digital  
con el levantamiento topográfico corregido  
FIGURA 12c

Escala vertical  
de ambos modelos  
1cm : 10 m  
  
Escala horizontal de  
ambos modelos  
1cm : 75 m

Figura 12: A. Sobreposición de las poligonales cerradas sobre el levantamiento original del bloque 2 del área experimental. Obsérvese como las líneas de inventario son dibujadas con un rumbo norte franco, cuando en realidad en el campo se encuentran en su mayoría con un rumbo N-NE. B y C. Modelo de elevación digital antes y después de corregir el levantamiento, obsérvese como en el MED construido con los datos corregidos las pendientes son más pronunciadas.

Lo importante de resaltar en este análisis es la presencia de anisotropía en los datos, donde la elevación alcanza su máxima variación cuando el vector  $|h|$  tiene un acimut de  $19^\circ$ . Lo cual sugiere que para obtener un diseño óptimo de carriles de levantamiento topográfico para esta área el carril principal deberá ser establecido perpendicularmente a dicha dirección ( $109^\circ$ ).

De este modo, los carriles laterales estarían ubicados en la dirección de máxima variación, aplicando así una mayor intensidad de muestreo en dicho sentido.

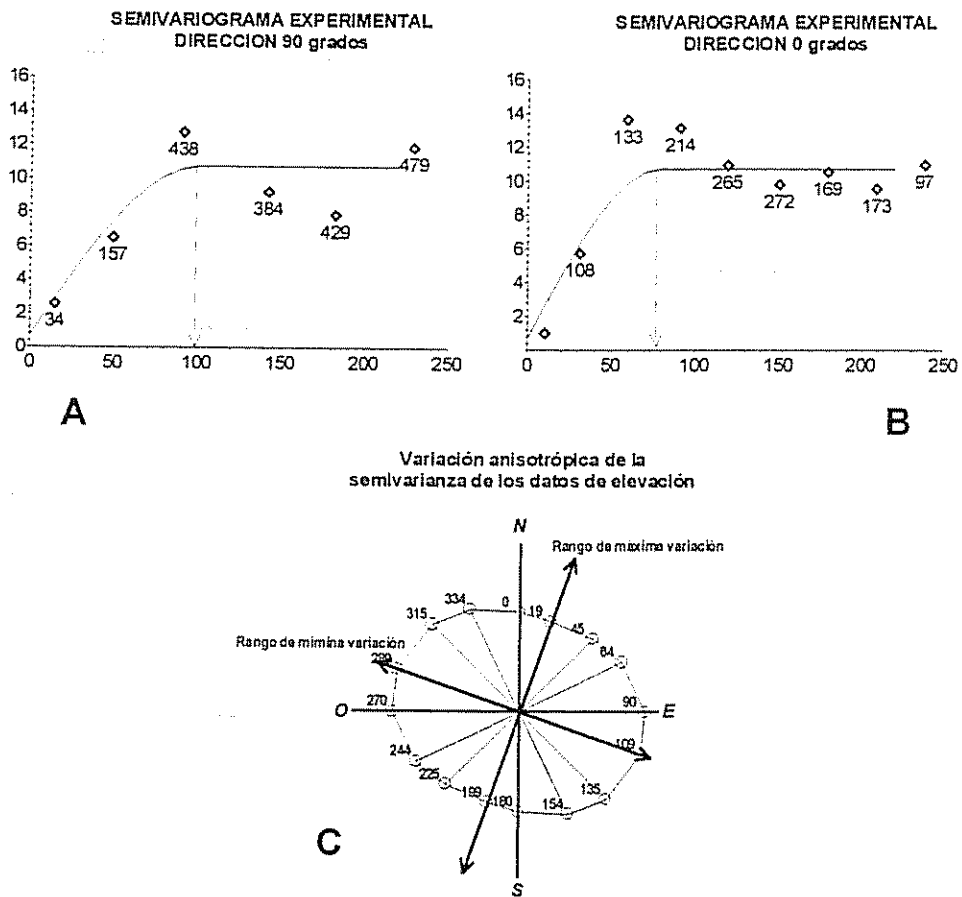


Figura 13: A y B: Semivariograma anisotrópico de los datos de elevación del bloque 2 en el sitio de estudio. Obsérvese como la variación máxima de los datos se alcanza a un rango diferente según la dirección en la cual se evaluó la semivarianza. C: Variación del rango del semivariograma en función de la dirección del vector  $|h|$ .



### 5.3.2.2 Interpolación del modelo del elevación digital.

Utilizando la información del semivariograma experimental se interpoló un MED del bloque 2 del sitio de estudio utilizando Ordinary Kriging.

No se utilizó Universal Kriging por cuanto los datos a interpolar provienen de un sitio plano con algunas lomas y depresiones sin una tendencia fuerte de disminución de la elevación en ningún sentido.

Por otra parte el semivariograma experimental no presentó la suave curva parabólica cóncava hacia arriba cerca del origen mencionada como evidencia de dichas tendencias por Webster y Burgess (1980).

Con el fin de comparar el desempeño de Kriging también se utilizaron las técnicas Distancia Inversa y Mínima Curvatura con los parámetros por omisión del programa Surfer for Windows 6.0. En la técnica Kriging se utilizaron tanto los parámetros por omisión como los estimados en el semivariograma experimental.

Una vez ajustados los MED se realizó una validación utilizando un juego de 93 datos de elevación independiente de los utilizados en la interpolación. Los parámetros de ajuste y los resultados de la validación de los MED se resumen en el cuadro 10.

La sumatoria de los residuos en todos los modelos fue mayor a cero, lo que indica que independientemente de la técnica los MED sobrestiman la elevación, especialmente el interpolado con la técnica Distancia Inversa.

Por otra parte, si bien en la literatura no se encontró un criterio formal que indique cual de los cuatro MED interpolados es el de mejor ajuste, se utilizó la raíz cuadrada del error medio cuadrático como indicador – REMC - (ver Gao, 1997).

El REMC en general fue muy bajo para todos los MED excepto para el interpolado con la técnica Distancia Inversa. Sin embargo el modelo interpolado con Ordinary Kriging, utilizando los parámetros del semivariograma experimental, presentó el mejor ajuste.

**Cuadro 10: Parámetros utilizados en el ajuste de un modelo de elevación digital para el bloque 2 del área de estudio utilizando diferentes técnicas de interpolación**

PARAMETROS	MED 1	MED 2	MED 3	MED 4
Método de interpolación	Kriging ordinario	Kriging ordinario	Curva mínima	Distancia inversa a una potencia
Densidad de la malla de interpolación	5 m x 5 m	5 m x 5 m	5 m x 5 m	5 m x 5 m
Opciones/Parámetros	Modelo: Esférico <sup>(1)</sup> Rango: 102.3893 m <sup>(1)</sup> Sill: 10 m <sup>2</sup> <sup>(1)</sup> Efecto Nugget: 0.6997m <sup>2</sup> <sup>(1)</sup>	Modelo: Lineal <sup>(2)</sup> Rango: 303 m <sup>(2)</sup> Sill: 10.6 m <sup>2</sup> <sup>(2)</sup> Efecto Nugget: 0 m <sup>2</sup> <sup>(2)</sup>	Max. residual: 0.0146883 <sup>(2)</sup> Max. iteration: 2000 <sup>(2)</sup>	Potencia: 2 <sup>(2)</sup> Smoothing: 0 <sup>(2)</sup>
Anisotropía	Relación: 0.74 <sup>(1)</sup> Dirección: 19° <sup>(1)</sup>	Relación: 1.0 <sup>(2)</sup> Dirección: 0° <sup>(2)</sup>	Relación: 1.0 <sup>(2)</sup> Dirección: NA	Relación: 1.0 <sup>(2)</sup> Dirección: 0° <sup>(2)</sup>
Tipo de búsqueda	Simple	Simple	NA	Simple
Elipse de búsqueda				
Radio 1	303 m <sup>(2)</sup>	303 m <sup>(2)</sup>	NA	303 m <sup>(2)</sup>
Radio 2	303 m <sup>(2)</sup>	303 m <sup>(2)</sup>	NA	303 m <sup>(2)</sup>
Dirección	0° <sup>(2)</sup>	0° <sup>(2)</sup>	NA	0° <sup>(2)</sup>
Ajuste del MED <sup>(3)</sup>				
Sumatoria de residuos:	0.4420 m	1.1754 m	0.2735 m	10.5610 m
Residuo promedio sin signo:	0.2600 m	0.2715 m	0.2934 m	0.3484 m
Índice residual normalizado:	0.0325	0.0339	0.0366	0.0435
Raíz cuadrada del error medio cuadrático:	0.44047	0.44462	0.44962	0.57677
Tamaño muestra de validación:	93	93	93	93

<sup>(1)</sup> Datos estimados mediante el cálculo de un semivariograma experimental (ver apartado 5.3.2.1)

<sup>(2)</sup> Opciones y valores por omisión recomendados por el programa utilizado en la interpolación de los MED (Surfer for Windows 6.0).

<sup>(3)</sup> Validación de los MED utilizando una muestra de datos de elevación independiente de los utilizados en la interpolación.

NA: No aplica

El mismo resultado se obtuvo con otro parámetro de comparación: Índice Residual Normalizado<sup>8</sup>, con el cual se comparó en forma empírica el ajuste del MED. Con dicho parámetro nuevamente todos los modelos a excepción del construido con la técnica de Distancia Inversa presentaron un ajuste similar, donde la técnica Ordinary Kriging con los parámetros del semivariograma experimental presentó el mejor ajuste.

En conclusión las técnicas Ordinary Kriging y Curva Mínima proporcionaron resultados similares en la interpolación del MED del bloque 2 del área experimental (ver figura 14), sin embargo Kriging aportó los mejores resultados, especialmente cuando se utilizan los parámetros del semivariograma experimental de los datos. Dada esta situación se utilizó entonces el MED 1 en el trazado de las vtm.

### **5.3.3 Diseño asistido por computadora de las vías de transporte menor**

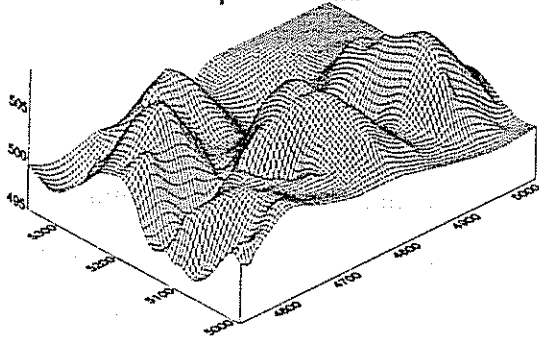
Para realizar el diseño asistido por computadora se utilizó el módulo Pathway del programa para el procesamiento y análisis de imágenes raster: Idrisi for Windows 2.0. Con dicho módulo fue posible establecer una propuesta de red de vtm cuyo trazado en teoría minimizó el consumo de tiempo durante el arrastre y la extracción de los árboles.

Con Pathway se realizó una evaluación iterativa de todas las diferentes rutas posibles entre dos puntos, hasta encontrar aquella donde la distancia y gasto total de tiempo a invertir fuese mínimo.

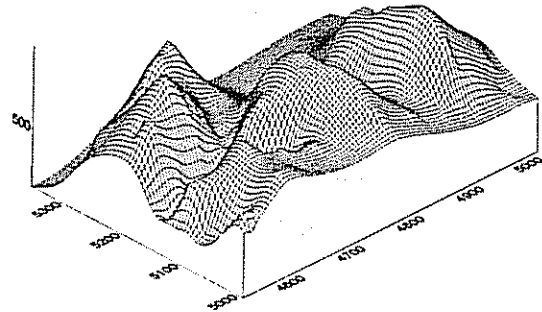
---

<sup>8</sup> El índice residual normalizado se calcula dividiendo el promedio de los valores absolutos de los residuos entre el promedio de elevación de los datos utilizados en la validación; por lo tanto entre más cerca de cero esté el valor mejor será el ajuste del MED (Berry, 1997).

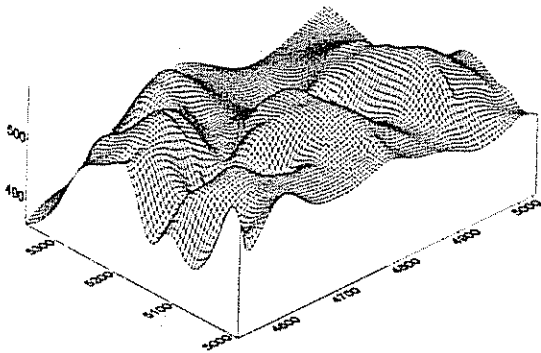
ORDINARY KRIGING  
parámetros del semivariograma  
experimental



ORDINARY KRIGING  
parámetros por omisión



CURVA MINIMA



DISTANCIA INVERSA

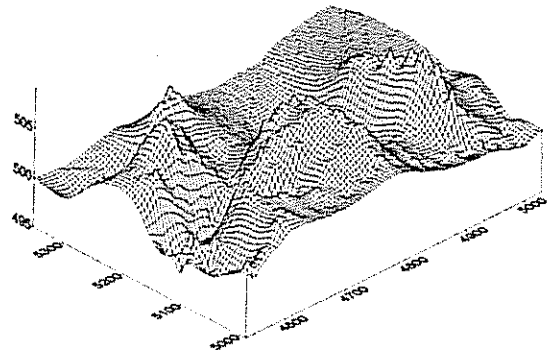


Figura 14 : Modelos de elevación digital interpolados con las técnicas Distancia Inversa, Curva mínima y Ordinary Kriging utilizando los parámetros por omisión de Surfer for Windows y utilizando los parámetros de un semivariograma experimental en Ordinary Kriging. Obsérvese como entre Ord. Kriging por omisión y Ord. Kriging experimental casi no hay diferencia, además de que ambos presentan los mejores ajustes. En los MED interpolados con las otras técnicas el ajuste fue menor

### 5.3.3.1 Construcción de la superficie de fricción

El análisis anterior se realizó sobre una superficie de fricción donde para cada pixel se calculó el costo de moverse sobre el mismo. La unidad de dicho costo es la cantidad de tiempo necesario para moverse sobre un pixel bajo las condiciones más favorables.

Partiendo del hecho de que el arrastre de las trozas es más favorable conforme la pendiente disminuye, el tiempo mínimo a consumir por un tractor agrícola de llantas sencillas durante el arrastre de una troza de 1.5 m<sup>3</sup> de guácimo en una distancia de 5 m<sup>(9)</sup> es, de acuerdo a la ecuación 7<sup>(10)</sup>, de:

$$\text{si } \frac{1}{y} = a + bx + cz \text{ para } x = 5m \text{ y } z = 0\% \Rightarrow y_{base} = 1.06$$

Entonces de acuerdo a lo anterior el costo de pasar por cada pixel en la superficie de fricción está dado por:

$$\text{costo} = \frac{1}{(0.9776125 - 0.0075898 - 5.3129808 * z)^2} \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde  $z$  es la pendiente en el pixel evaluado

Sin embargo, para el cálculo de la superficie de fricción la ecuación 30 no se aplicó para toda el área del bloque 2 por las siguientes razones:

- a. La ley establece que todas aquellas áreas de bosque ubicadas en las riberas de los ríos, quebradas y drenajes intermitentes deben ser consideradas como zonas de protección. Esta parte del bosque se considera como zona de protección hídrica y tiene un ancho

<sup>9</sup> Se dice que a una distancia de 5m debido a que el tamaño del pixel de la imágenes rasterizadas del bloque 2 es de 5x5m.

<sup>10</sup> Si bien un tractor agrícola de llantas podría arrastrar a una mayor velocidad cuesta abajo este factor no fue considerado en la ecuación de regresión, por lo tanto se asume que la condición más favorable se da cuando la pendiente es igual a 0%.

- de 15 m si la pendiente es menor al 30% y de 50 m si esta es mayor. En dichas áreas está prohibido el tránsito de maquinaria.
- Como ya se mencionó en la sección 5.2.1 y de acuerdo a la ecuación 2, el modelo de regresión utilizado tiene validez solamente para el intervalo de pendientes  $[0, 18.23\%[$  cuando la distancia de arrastre es igual a 5 m. Además a partir de un 18.23% de pendiente la capacidad de arrastre del tractor agrícola utilizado se redujo significativamente. Por esta razón todas aquellas áreas de pendiente superior al 18.23%, se consideraron como no aptas para el tránsito de maquinaria.
  - También se excluyó del cálculo de fricción con la ecuación 30 todas aquellas áreas de bosque fuera de los límites del bloque 2, tratando de simular las condiciones de trazado de vtm de una pequeña propiedad privada.

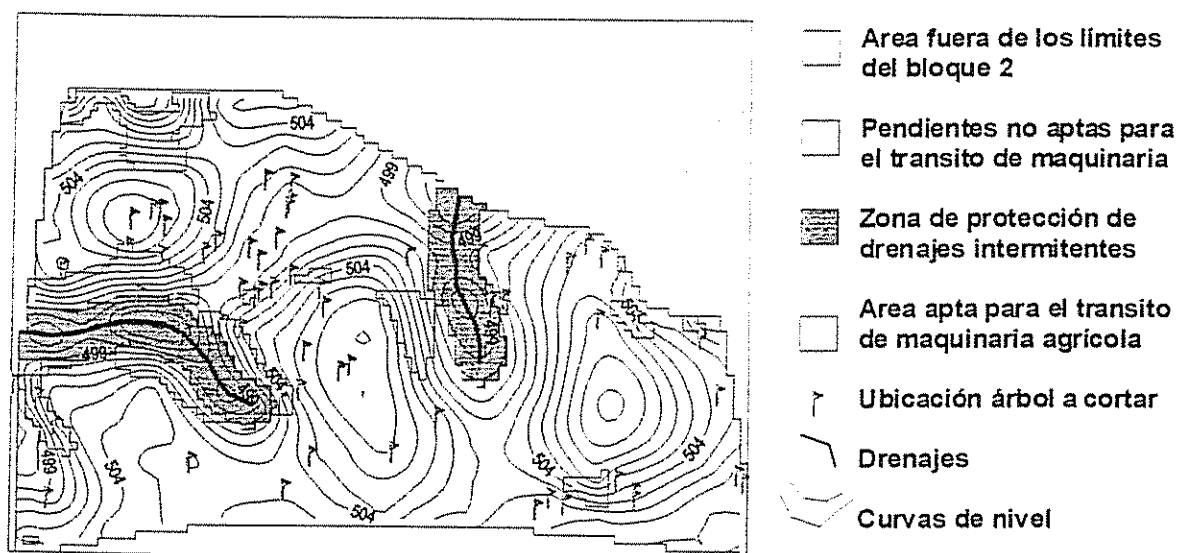


Figura 15: Ubicación de áreas restringidas para el tránsito de maquinaria agrícola del bloque 2 del sitio del área experimental.

Dadas las limitaciones de tránsito de maquinaria, a estas áreas en particular se les otorgó un costo de tránsito en la superficie de fricción de 5000 veces el tiempo base, esto con el fin de evitar que el módulo pathway trazara vtm sobre estas áreas. El resto del bloque 2 se consideró como apto para el tránsito de la maquinaria agrícola.

Una vez definidas estas limitantes se procedió al cálculo de la fricción para cada uno de los pixeles ubicado dentro del área apta para el tránsito de maquinaria agrícola utilizando la ecuación 30.

Con dicha superficie de fricción, la ubicación de los árboles a extraer y la ubicación de la salida<sup>11</sup> de las vtm, se corrió en forma reiterada el módulo pathway de modo que cada segmento de vtm fue trazado desde el árbol hasta la salida planteada al inicio del procedimiento o bien al final de la vtm trazada más cercana.

De este modo fue necesario correr el algoritmo tantas veces como árboles a cortar existían, aspecto que no significó mucho trabajo dado que Idrisi cuenta con un sistema de rutinas con comandos de línea que automatizaron el procedimiento.

Por otra parte el hecho de establecer la ruta de menor fricción entre la vtm establecida más cercana hasta el pie de cada árbol a cortar y no hasta un punto que indicase una concentración de varios árboles, responde a la necesidad de disminuir el uso del cable.

Como ya se documentó en el apartado 5.2.2, si bien el no utilizar el cable incrementa la longitud total de la red vtm, el evitar su uso disminuye considerablemente el tiempo de extracción.

---

<sup>11</sup> Se consideró como salida de las vtm todo aquel punto del límite del bosque por donde el tránsito de la maquinaria fuese posible y tuviese un acceso directo al patio de cargadero.

Debido a lo anterior, en el trazado de vtm con pathway no se restringió el acceso de la maquinaria hasta el tocón del árbol por cuanto el operador de distancia al buscar la ruta de menor fricción también minimiza la longitud total de la vtm. De este modo al minimizar la distancia se optó por disminuir la longitud de las líneas de extracción para así también disminuir el tiempo consumido y optimizar la operación.

La propuesta de trazado de la red vtm se presenta en la figura 16, obsérvese como el algoritmo evidentemente evita el paso por zonas de alta fricción. Por otra parte algunos de los árboles no fueron conectados por la red de vtm debido a que no eran accesibles para el tractor (ver figura 15).

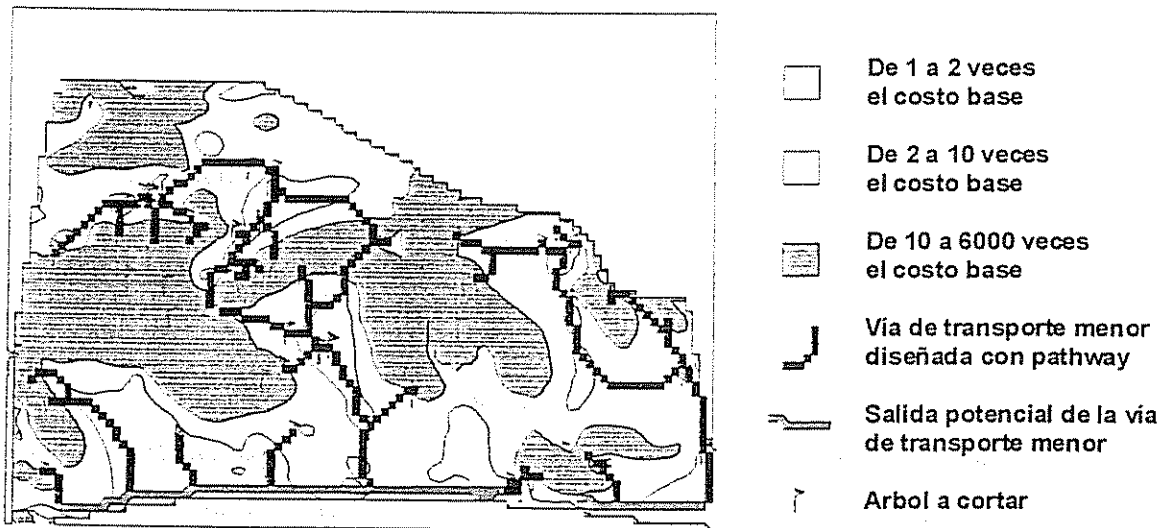


Figura 16: Superficie de fricción y propuesta de diseño de vías de transporte menor para el bloque 2 del área experimental.



#### 5.3.4 Establecimiento de la propuesta de red de vías de transporte menor en el campo

Es un hecho que en cualquier procedimiento asistido por computadora la calidad de la información es vital. En este caso en particular, el diseño de la red vtm depende de la precisión del MED utilizado en el análisis del algoritmo pathway.

Como ya se expuso en el apartado 5.3.1 la precisión del MED está afectada por la exactitud del levantamiento topográfico, el cual para esta área se realizó utilizando equipo forestal de baja precisión topográfica. Situación que junto a la intensidad de muestreo del levantamiento topográfico (carriles cada 75 m) y el desempeño de la técnica de interpolación utilizada, limita la precisión del MED. Es por esta razón que el diseño de la red vtm obtenida por el método anterior fue considerado como una propuesta a la hora de establecer la misma en el campo.

Debido a lo anterior el establecimiento de las vtm se realizó siguiendo en lo posible la propuesta, sin dejar de lado el criterio del supervisor del aprovechamiento en el momento de evaluar e implementar algún cambio.

Las vtm se abrieron conforme los árboles se cortaron, no se hizo al contrario a pesar de que se conocía de antemano la ruta de la vtm debido a que la caída de los árboles de guácimo es muy difícil de controlar dado que la madera es muy liviana y el árbol pequeño.

En la figura 17 se muestra la propuesta de pathway y la red como finalmente quedó establecida en el campo. Puede apreciarse que no se estableció la propuesta tal y como quedó luego de correr el algoritmo.

La misma presenta modificaciones en algunos segmentos y así como ciertos tramos del todo no se abrieron debido a que los árboles a los que daba acceso no calificaban para ser aprovechados como materia prima para fósforos.

Las modificaciones en el trazado respondieron a problemas en la dirección de caída de los árboles, así como a la presencia de árboles caídos de más de un metro de diámetro, o bien simplemente responder cambios realizados por el supervisor del aprovechamiento, quien a su juicio consideró que dicha alteración mejoraba el trazado. Así como también dichas modificaciones pueden atribuirse a problemas en la precisión del MED.

Sin embargo en la figura 17 puede apreciarse como el trazado en general se ajustó a la propuesta inicial. Cabe destacar, que a diferencia del trazado in situ, el hecho de contar con una propuesta de red de vtm debidamente estudiada facilitó la labor de supervisión del aprovechamiento al evitar la improvisación en la toma de decisiones.

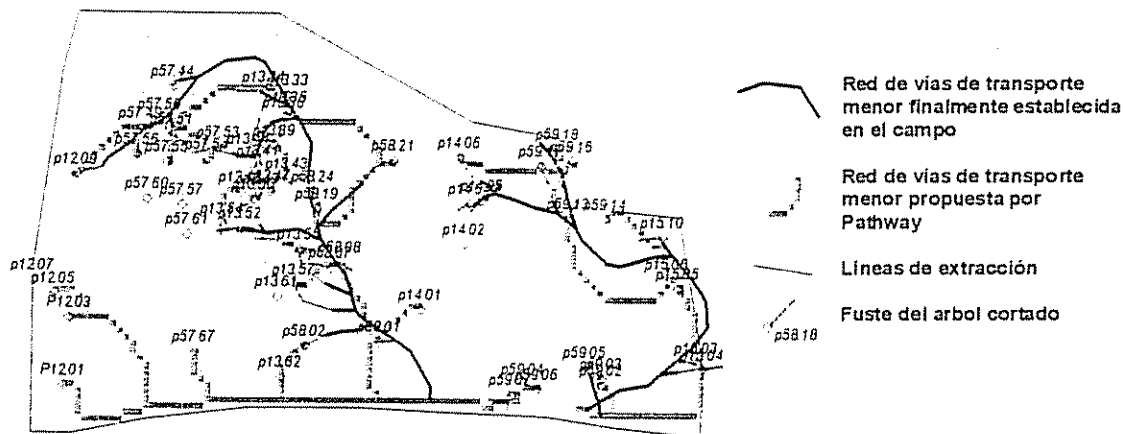


Figura 17: Red de vías de transporte menor finalmente establecidas en el campo durante el aprovechamiento del guácimo siguiendo la propuesta de diseño construida con el algoritmo Pathway de Idrisi for Windows 2.0.

#### **5.4 Comparación de los dos niveles de planificación de las vías de transporte menor en el aprovechamiento del guácimo**

El desempeño del diseño de vtm producido con el algoritmo pathway fue comparado con el obtenido con el trazado manual de las vtm que se ha venido realizando en los aprovechamientos forestales supervisados por FUNDECOR<sup>12</sup>.

Dicha comparación se realizó tanto en términos del impacto producido al piso del bosque como por su efecto en el tiempo consumido durante las operaciones arrastre y extracción.

##### **5.4.1 Impacto sobre el piso del bosque**

Las variables de respuesta utilizadas para evaluar el impacto sobre el piso del bosque fueron la cantidad de metros de vtm y la cantidad de metros de cable utilizado en la extracción por unidad de área.

Dichas variables se evaluaron en parcelas imaginarias de  $\frac{1}{4}$  hectárea, dispuestas como se muestra en la figura 18. Solamente se tomaron en cuenta para evaluación aquellas parcelas donde se disturbó el bosque durante la corta, caída, extracción y arrastre de los árboles.

Es importante aclarar que los resultados obtenidos con este tipo de muestreo podría estar afectado por la posición y tamaño de las parcelas imaginarias. Por lo tanto dichas parcelas fueron establecidas tratando de contabilizar el menor número de parcelas impactadas en ambos bloques. Un resumen de la información evaluada se presenta en el anexo 1.

La comparación del impacto producido por las vtm se realizó mediante un análisis de covarianza, ya que por lo general existe una relación lineal entre el porcentaje del piso del bosque cubierto de vías de extracción y la intensidad de corta.

El resumen del análisis de covarianza se presenta en el tabla 1. En dicho análisis no se encontraron diferencias significativas en la cantidad de metros lineales de vías de transporte menor por parcela entre diseños; resultado que implica que ambos diseños produjeron la misma densidad de vías de transporte menor.

Otro aspecto importante a destacar de este análisis es que la densidad de la red de vtm está en función de la intensidad de corta.

Tabla 1. Comparación del número de metros lineales de vías de transporte menor por parcela de ¼ de hectárea observados en dos niveles de planificación de la red vtm durante el aprovechamiento de guácimo (*Goethalsia mehianta*), en bosque húmedo tropical. Heredia, Costa Rica.

Fuente de Variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Probabilidad de F	Poder ( $\alpha=0.05$ )
Número de árboles cortados por parcela	1	6219.423	6219.423	5.66	0.020949*	0.638904
Diseño de vtm utilizado	1	1537.467	1537.467	1.40	0.242154	
Error	54	59365.47	1099.361			
Total (Ajustado)	56	66448.01				
Total	57					

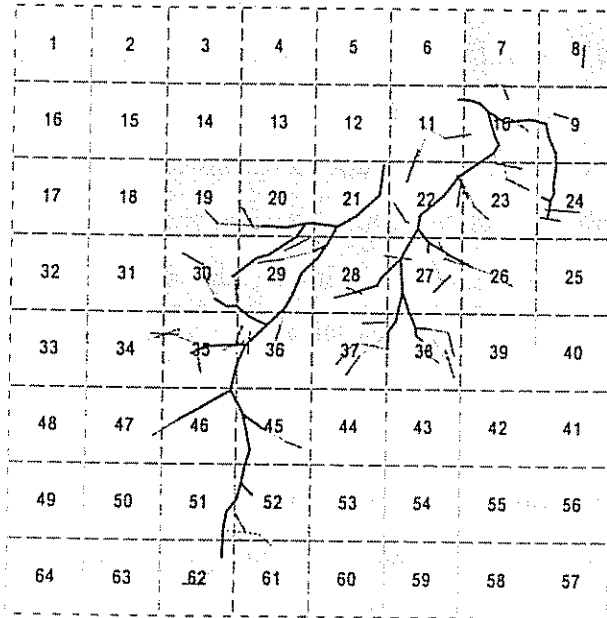
\* Término significativo a un  $\alpha = 0.05$

a) Se utilizó la prueba de F recomendada por Hintze (1997) para validar el supuesto de que la pendiente de la relación lineal entre el porcentaje del piso del bosque cubierto por las vtm y la intensidad de corta es la misma para ambos tratamientos. En dicha prueba se obtuvo una probabilidad de un valor mayor a F de 0.759981, con lo cual no se rechaza "H<sub>0</sub>: Las pendientes son iguales".

b) Término	Obs	Media por parcela	Error Estándar
Modelo	57	38.90759	
A: Tratamiento			
Diseño manual	28	33.67034	6.26601
Diseño asistido	29	44.14485	6.157027

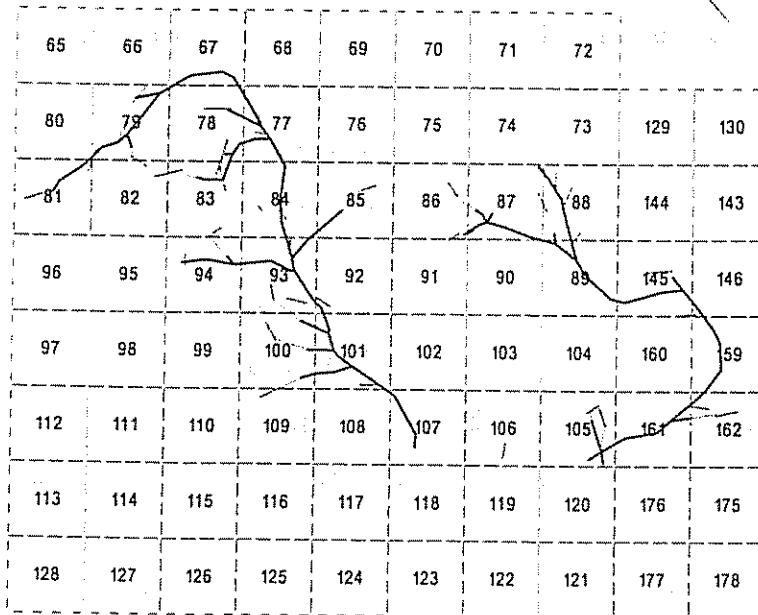
<sup>12</sup> La forma en que se realiza el diseño manual de las vtm se describe en la sección 4.3.1

**BLOQUE 1: RED DE VIAS DE TRANSPORTE MENOR  
OBTENIDAS MEDIANTE DISEÑO MANUAL**



- 3 Parcela de 0.25 ha no evaluada
- 7 Parcela de 0.25 ha evaluada
- Vía de transporte menor

**BLOQUE 2: RED DE VIAS DE TRANSPORTE MENOR  
OBTENIDAS MEDIANTE DISEÑO ASISTIDO**



- Fuste caído y línea de extracción

Figura 18: Red de vías de transporte menor establecidas durante el aprovechamiento del guácimo en dos bloques de aproximadamente 15 ha cada uno. Obsérvese la malla imaginaria de 50 m x 50 m sobrepuesta para el levantamiento del número de metros lineales de vtm y cable utilizado en la extracción de los árboles por unidad de área (en parcelas de ¼ ha). Dichos datos fueron utilizados en la comparación del desempeño de los diseños de vías de transporte menor manual y asistido por computadora.

Si bien el impacto al piso del bosque fue el mismo en términos de la cantidad de metros de vtm producidos con ambos diseños, no fue así con el uso del cable de extracción. En el diseño de vtm producido por pathway se tuvo que utilizar menos el cable.

En el bloque 1 se utilizó el equivalente a un promedio de  $52.4 \text{ m} \cdot \text{ha}^{-1}$  de cable, mientras que en el bloque 2 solamente  $28.32 \text{ m} \cdot \text{ha}^{-1}$ . La diferencia entre estas medias es altamente significativa dado que según la prueba de Wilcoxon para varianzas iguales la media del bloque 1 es mayor que la del bloque 2 con un valor de  $Z=2.4882$  y una probabilidad de 0.006419.

Si bien el uso del cable en la extracción disminuye la longitud total de la red vtm, de acuerdo a los resultados expuestos en el apartado 5.2.2 por cada metro de cable que se utilice en la extracción del guácimo es necesario invertir 0.69 minutos más de tiempo.

Esto sugiere que si bien ambos diseños produjeron la misma densidad de vías de transporte menor, el diseño asistido por computadora fue más eficiente por cuanto disminuyó el uso del cable en forma significativa, lo cual se traduce en un ahorro en tiempo y costo de la operación extracción. Actividad más importante en el aprovechamiento del guácimo, dado que consumió un 35.6% del tiempo efectivo (ver figura 8).

Con relación al disturbio producido al piso del bosque, al parecer ambos produjeron el mismo impacto, ya que ambos tuvieron la misma densidad de vtm. Sin embargo el hecho de haber utilizado una menor cantidad de metros de cable en la extracción implica que en el bloque 2 la red vtm pasó más cerca de los árboles que en el bloque 1.

Lo anterior sugiere que en el bloque 2 existe una mayor posibilidad de haber transitado con la maquinaria sobre los claros abiertos por los árboles cortados. Situación que aún no ha sido comprobada pero si observada en el campo.

De haber sido como se sugiere en el párrafo anterior y los claros fuesen lo suficientemente abiertos, el impacto producido al piso del bosque en el bloque 2 (diseño asistido) puede esperarse que sea mayor, ya que la remoción del suelo bajo los claros deja expuesto una mayor cantidad de material al impacto directo de la lluvia y posterior acarreo de sedimento a la red hidrológica. Sin embargo la sumatoria de área impactada en el bosque sería menor dada la sobreposición de los claros y las vtm.

#### **5.4.2 Impacto sobre la productividad de las operaciones arrastre y extracción**

Dado que el aprovechamiento en ambos bloques se realizó con la misma maquinaria, equipo y personal, lo lógico de esperar es que el diseño de las vtm no afectara significativamente el rendimiento en las operaciones de arrastre y extracción, obviamente bajo condiciones de pendiente y distancia de arrastre y extracción constantes.

Sin embargo dado que estas tres condiciones no fueron controladas se utilizó nuevamente un análisis de covarianza para comparar el tiempo consumido por las operaciones arrastre y extracción de una muestra de árboles tomada de cada uno de los bloques aprovechados.

Una vez ponderado el efecto de la distancia y pendiente promedio de la vtm al incluirlas en el modelo como covariables del tiempo consumido durante el arrastre, se obtuvieron diferencias altamente significativas entre diseños de vtm (ver tabla 2).

La media de tiempo consumido durante el arrastre para el bloque 1 fue de  $4.9 \text{ min} \cdot \text{arbol}^{-1}$  mientras que el bloque 2 fue de apenas  $2.03 \text{ min} \cdot \text{arbol}^{-1}$ . Esta diferencia en rendimiento puede atribuirse a una tercer variable no controlada entre los bloques, que bien podría ser la diferencia en el nivel de planificación o bien una variable no identificable en este estudio.

En el segundo caso, por lo observado en el campo, dicha variable pudo haber sido las condiciones del suelo al momento del arrastre. Durante el aprovechamiento del bloque 2 el suelo se encontraba más húmedo que cuando se aprovechó el bloque 1, incluso existía barro

suelto en la misma lo cual posiblemente disminuyó la resistencia al arrastre al encontrarse el suelo un poco más resbaloso.

Tabla 2. Comparación del tiempo consumido por troza durante el arrastre bajo dos niveles de planificación de las vías de transporte menor en el aprovechamiento de guácimo (*Goethalsia meiantha*), en bosque húmedo tropical. Heredia, Costa Rica.

Fuente de Variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Probabilidad de F	Poder ( $\alpha=0.05$ )
Distancia de arrastre	1	115.4575	115.4575	8.36	0.005199*	0.801674
Pendiente absoluta promedio de la vtm	1	654.4565	654.4565	47.41	0.000000*	0.99999
Diseño de vtm utilizado	1	89.39905	89.39905	6.48	0.013313*	
Error	65	897.2153	13.80331			
Total (Ajustado)	68	1591.364				
Total	69					

\* Término significativo a un  $\alpha = 0.05$

a) Se utilizó la prueba de F recomendada por Hintze (1997) para validar el supuesto de que la pendiente de la relación lineal entre la distancia y la pendiente de la vtm con el tiempo consumido durante el arrastre es la misma para ambos tratamientos. En dicha prueba se obtuvo una probabilidad de un valor mayor a F de 0.138162, con lo cual no se rechaza "Ho: Las pendientes son iguales".

b) Término	Obs	Media por parcela	Error Estándar
Modelo	69	3.493104	
A: Tratamiento			
Diseño manual	51	4.953341	0.5202434
Diseño asistido	18	2.038867	0.8757001

Independientemente del factor al cual se le atribuya dicho efecto, la mejora en el rendimiento de la operación de arrastre fue de un 100%. Se necesitan más pruebas para poder explicar los resultados obtenidos.

Por otra parte, en la comparación del tiempo consumido durante la extracción se ponderaron las medias con la covariable distancia de extracción de acuerdo a lo encontrado en los análisis de la sección 5.2.2. Los resultados del análisis de covarianza se presentan en la tabla 3.



Si bien, también en esta operación el tiempo consumido varió entre bloques, la diferencia entre medias no fue tan elevada como en el caso del arrastre, dado que la probabilidad de un valor mayor a F fue de 0.073679.

En el bloque 1 el tiempo consumido durante la extracción fue de 10.95 min\*árbol<sup>-1</sup> y en el bloque 2 fue de 7.85 min\*árbol<sup>-1</sup>, lo cual sugiere la posibilidad de que bajo el diseño asistido por computadora el rendimiento en la extracción mejoró.

Tabla 3. Comparación del tiempo consumido por troza durante la extracción bajo dos niveles de planificación de las vías de transporte menor en el aprovechamiento de guácimo (*Goethalsia meiantha*), en bosque húmedo tropical. Heredia, Costa Rica.

Fuente de Variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Probabilidad de F	Poder ( $\alpha=0.05$ )
Distancia de extracción	1	1133.468	1133.468	34.69	0.000000*	0.999916
Diseño de vtm utilizado	1	108.9575	108.9575	3.33	0.073679**	
Error	51	1666.247	32.6715			
Total (Ajustado)	53	3229.757				
Total	54					

\* Término significativo a un  $\alpha = 0.05$

\*\* Término significativo a un  $\alpha = 0.10$

a) Se utilizó la prueba de F recomendada por Hintze (1997) para validar el supuesto de que la pendiente de la relación lineal entre la distancia de extracción y el tiempo consumido es la misma para ambos bloques. En dicha prueba se obtuvo una probabilidad de un valor mayor a F de 0.143324, con lo cual no se rechaza "Ho: Las pendientes son iguales".

b) Término	Obs	Media por parcela	Error Estándar
Modelo	54	9.402549	
A: Tratamiento			
Diseño manual	35	10.95228	0.9661633
Diseño asistido	19	7.852818	1.311317

### 5.5 Comentario general

En la literatura se hace mucho énfasis al uso del cable y la dirección controlada de caída como medidas de mitigación, al punto de que son consideradas de acatamiento obligatorio si lo que se pretende es minimizar el impacto del aprovechamiento.

Sin embargo, no se menciona nada acerca del efecto que tiene la implementación de este tipo de medidas en el rendimiento de la corta, extracción y arrastre de los árboles. Para el caso particular del aprovechamiento del guácimo, como se ha observado en este estudio, tanto la corta dirigida y como el uso del cable afectaron negativamente su rendimiento, especialmente el uso del cable, y en menor grado la corta dirigida en ángulo agudo con respecto a la vía de transporte menor.

Esta situación debe llamar la atención de los profesionales forestales, dado que si bien tales medidas mitigan el efecto del aprovechamiento, podrían terminar siendo un desincentivo para el empresario forestal, al tener que internalizar el costo de minimizar el impacto de las operaciones forestales a costa de una potencial reducción en el rendimiento.

Esta situación podría provocar un efecto contraproducente en la conservación de los bosques. No se debe perder de vista que lo que mantiene el bosque en pie es su capacidad de producir bienes y servicios.

Es por tal razón que el profesional forestal debe prestar mayor atención a este tipo de medidas, tratando de encontrar un equilibrio entre la productividad y el impacto producido durante el aprovechamiento. La presente investigación es un esfuerzo por encontrar dicho equilibrio en la planificación del aprovechamiento forestal, específicamente en el trazado de las vías de transporte menor.

En este caso en particular se logró planificar una red vial que minimizara tanto el impacto al piso del bosque como el impacto en el rendimiento de las operaciones de aprovechamiento con resultados favorables.

Como puede verse en los resultados del apartado 5.4 el diseño asistido por computadora calculó una propuesta que disminuyó la necesidad del uso del cable sin tener que aumentar la densidad de vías de transporte menor.

Si bien las condiciones en que se realizó este ejercicio son muy particulares, lo importante de rescatar es la metodología utilizada y la posibilidad de su aplicación para diferentes condiciones de trabajo (equipo, personal, maquinaria, tipo de bosque).

Como ya se mencionó en la sección 4.3, para utilizar el operador de distancia Pathway es necesario construir una superficie de fricción que represente adecuadamente el efecto de las variables más importantes que afectan el rendimiento de las operaciones del aprovechamiento.

Suponiendo que para cada tipo de bosque, equipo, personal y maquinaria utilizado en el aprovechamiento exista un juego de parámetros en particular, bastaría entonces con generar la información necesaria para identificar dichas variables durante la ejecución de un aprovechamiento de calibración.

Es importante aclarar que la implementación de este tipo de técnicas de optimización implica la inversión de tiempo y dinero en personal capacitado, equipo de computación, licencias de software y en la recolección de la información de campo necesaria. Situación que pone a este nivel de planificación lejos del alcance de los empresarios forestales acostumbrados a invertir poco en planificación.

Es por esta razón que los llamados impulsar, incentivar e implementar el uso de estas nuevas técnicas de planificación son las organizaciones no gubernamentales, instituciones de investigación y de gobierno dedicadas a la protección y utilización racional de los recursos naturales de nuestro continente.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El rendimiento de la extracción y el arrastre del guácimo bajo las condiciones particulares de este estudio, es afectado básicamente por dos factores: pendiente absoluta promedio de la vtm, y el uso del cable en la extracción de los fustes. En menor grado afectan la distancia de arrastre y la dirección de caída de los árboles.

El tiempo consumido en el arrastre varía en forma directa a la pendiente absoluta promedio de la vía de transporte menor, y en menor grado, a la distancia de arrastre. En este caso el rendimiento no se vio afectado por el largo ni el volumen de la troza, dada la uniformidad de los fustes cortados. Por otra parte, el uso del cable obligó al operador del tractor agrícola a invertir 0.69 minutos más por cada metro de cable extendido en la extracción de los fustes.

Identificadas estas variables fue posible construir una superficie de fricción útil para el diseño de vías de transporte menor con el operador de distancia Pathway, mediante la estimación de la fricción relativa de desplazamiento por un sitio dado en función de la pendiente y la distancia de arrastre (ecuación 30).

La precisión de esta superficie de fricción pudo verse afectada por la calidad del levantamiento de los datos y la técnica utilizada en la interpolación del modelo de elevación digital, por cuanto se encontraron diferencias significativas en las estimaciones de elevación obtenidas de un MED ajustado con datos topográficamente corregidos con las de un MED interpolado con información sin corregir. Por otra parte la técnica de interpolación también afectó la precisión del MED, siendo Kriging la técnica de mejor ajuste, especialmente cuando los parámetros son ajustados mediante un análisis de semivarianza.

No fue posible establecer la propuesta de vías de transporte menor tal y como fue generada con el operador de distancia pathway. Las modificaciones en el trazado respondieron a

problemas de dirección de caída, presencia de obstáculos diversos y a las limitantes del modelo de elevación digital. Sin embargo en general, el trazado se ajustó a la propuesta inicial. Cabe destacar que a diferencia del trazado manual in situ, el hecho de contar con una propuesta bastante aproximada de la red vtm, facilitó la labor de supervisión del aprovechamiento y evitó la improvisación en la toma de decisiones.

Finalmente en cuanto a las hipótesis planteadas al inicio de esta investigación no se encontró evidencia estadística para descartar la ausencia de un efecto en la densidad de la red de vías de transporte menor diseñada con el operador de distancia Pathway. Esto por cuanto el diseño asistido y el manual produjeron la misma densidad de vías de transporte menor.

Sin embargo con respecto al efecto en la productividad de las operaciones arrastre y extracción, si bien en la prueba realizada se rechaza la hipótesis nula, no existe una razón lógica e identificable en este estudio que explique por qué el diseño asistido mejoró el rendimiento en la extracción y el arrastre de los fustes.

No obstante, el hecho de que en el diseño asistido por computadora el uso del cable fuese significativamente menor, sugiere que necesariamente con este sistema de trazado se reduce el tiempo consumido durante la extracción, mejorando el rendimiento de la operación impactando la misma área del piso del bosque que el diseño manual.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- ABDULHADI, B.; KARTAWINATA, K.; SUKARDJO, S. 1981. Effects of mechanized logging in the lowland dipterocarp forest at Lempake, East Kalimantan. *The Malaysian Forester* 44(2y3):407-418.
- ANAYA, H.; CHRISTIANSEN, P. 1986. Aprovechamiento forestal: análisis de apeo y transporte. Editorial IICA. San José, Costa Rica. 247 p.
- ARANA, L.G.; 1992. Análisis espacial para evaluar la erosión hídrica en la subcuenca del río Pensativo, Guatemala. Tesis M.Sc., Turrialba, C.R., CATIE, 118 p.
- ARNOLDUS, H.M.J. 1977. Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. Roma. FAO Conservation guide n°. 1. p 99-124
- BECKER, G; JEAGER, D. 1992. Integrated design, planning and evaluation of forest roads and logging activities using gis-based interactive cad-systems. *In* Sessions, J. Proceedings of the workshop on computer supported planning of roads and harvesting. IUFRO and University of Munich. Feldafing, Germany. 159-164 p.
- BREN, L.J. 1995. Aspects of the geometry of riparian buffer strips and its significance to forestry operations. *Forest Ecology and Management*, 75: 1-10.
- BROWN, S.; SCHREIER, H.; THOMPSON, W.A.; VERTINSKY, I. 1994. Linking multiple accounts with GIS as decision support system to resolve forestry/wildlife conflicts. *Journal of Environmental Management* 42:349-364.
- BROWNLIE, R.K.; TERLESK, C.J. Using geographical information system to map and determine the extent of mayor soil disturbance resulting from a logging operation. *New Zealand Forestry*, august (1995):23-26
- BRUIJNZEEL, L.A. 1990. Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion: a state-of-knowledge review. Unesco, Paris, and Free Univ., Amsterdam. 224p.
- \_\_\_\_\_. 1991. Hydrological impacts of tropical forest conversion. *Nature & Resources*, 27(2):37-46.
- \_\_\_\_\_. 1992. Managing tropical watersheds for production: where contradictory theory and practice co-exist. *In* Miller, F.R.; Adam, K.L., eds. Wise management of tropical forest. Proceedings of the Oxford Conference on Tropical Forest. Oxford Forestry Institute. University of Oxford. Oxford, G.B. p. 37-75.

- BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. 1980 a. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I the semi-variogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*. 31:315-331.
- \_\_\_\_\_. 1980 b. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II the block kriging. *Journal of Soil Science*. 31: 333-341.
- BURGESS, T.M.; WEBSTER, R.; McBRATNEY, B. 1981. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. IV sampling strategy. *Journal of Soil Science*. 32:643-659.
- CALDER, R. Y. 1993. Hydrologic effects of land-use change. *In* Maidment, D.R. *Handbook of Hidrology*. McGraw Hill, New York, USA. p. 13.1-13.50.
- CANNON, C.H.; PEART, D.R.; LEIGHTON, M.; KARTAWINATA, K. 1994. The structure of lowland rainfores after selective logging in West Kalimantan, Indonesia. *Forest Ecology and Management* 67:49-68.
- CROME, F.H.J.; MOORE, L.A.; RICHARDS, G.C. 1992. A study of logging damage in upland rainforest in North Queensland. *Forest Ecology and Management*, 49:1-29.
- CHUVIECO, E. 1990. *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones Rialp, S.A. Madrid, España. 453p.
- DELGADO, L.D. 1995. Efectos en la riqueza, composición y diversidad florística producidos por el manejo silvícola de un bosque húmedo tropical de tierras bajas en Costa Rica. Tesis M.Sc., Turrialba, C.R., CATIE, 97 p.
- DYKSTRA, D.P; HEINRICH, R. 1996. *FAO model code of forest harvesting practice*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 85 p.
- ESPINOZA, M. A.; 1992. Cobertura de copa del dosel superior y regeneración en el bosque húmedo tropical de San Carlos, Costa Rica. *In* II Congreso Forestal Nacional, 25, 26, 27 Noviembre 1992. San José, Costa Rica. 263p.
- FAO. 1978. *Planificación de carreteras forestales y sistemas de aprovechamiento*. Estudio FAO: Montes N° 2. 171 p.
- FAO. 1984. *La explotación maderera de bosques de montaña*. Estudio FAO: Montes N° 33. 285 p.
- FINEGAN, B. 1993. Estudios de crecimiento y rendimiento de especies arboreas maderables en bosques naturales primarios y secundarios en Sarapiquí, Costa Rica. *In* Salazar, R. ed. *Memorias de la Semana Científica*. 8-10 de diciembre, 1993. Volumen 2. Turrialba, Costa Rica. CATIE 137p.

- \_\_\_\_\_; CAMACHO, M.; DELGADO, L. D.; MEIR, P.; QUIROS, D.; SITEO, A.; ZAMORA, N.; 1995. Producción y conservación en bosques húmedos de Costa Rica: los efectos del aprovechamiento de madera y el tratamiento silvicultural sobre el crecimiento de los árboles y la biodiversidad vegetal. In CATIE ed. Resúmenes II Semana Científica. 4,5 y 7 de diciembre, 1995. Turrialba, Costa Rica. CATIE.
- FINKEL, H.J. 1982. Handbook of irrigation technology, Volume I. CRC Press. Florida, U.S. 369 p.
- GAO, J. 1997. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at micro-scale. *Int. J. Geographical Science*, 11(2):199-212.
- GILLMAN, G.P.; SINCLAIR, D.F.; KNOWLTON, R.; KEYS, M.G. 1985. The effect on some soil chemical properties of the selective logging of a North Queensland rainforest. *Forest Ecology and Management*, 12:195-214.
- GILMOUR, D.A. 1971. The effects of logging on streamflow and sedimentation in a North Queensland rainforest catchment. *Commonweath Forestry Review (Australia)* 50:38-48.
- HAMILTON, L.S.; KING, P.N. 1983. Tropical forested watersheds. Hydrologic and soils response to major uses or conversions. Westview Press, Boulder, Colorado. 168 p.
- HENDRISON, J. 1990. Damage-controlled logging in managed rain forest in Suriname. Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. 204p.
- HINTZE, J. 1997. NCSS 97: Stastiscal system for windows user's Guide-I. Number Cruncher Statistical Systems. Kaysville, Utah. 570 p.
- JONKERS, W.B.J. 1987. Vegetation structure, logging damage and silviculture in a tropical rain forest in Suriname. Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. 172p.
- KASRAN, B. 1988. Effect of logging on sediment yield in a hill dipterocarp forest in Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science* 1(1):56-66.
- KECKLER, D. 1995. Surfer for Windows. Version 6 user's guide. Golden Software, Inc. Colorado, USA.
- KOPPELMAN, R. 1990. Damage caused by selective logging in a neotropical rainforest. Msc Thesis, Agricultural Univesity, Wageningen, The Netherlands. 57p.



- LECUSTRE, R.; FARGETTE, D.; FAUQUET, C.; DE REFFYE, P. 1989. Analysis and mapping of the spatial spread of african cassava mosaic virus using geostatistics and the kriging technique. *The American Phytopathological Society*. 79(9):913-919.
- LIEBERMAN, D; LIEBERMAN, M; HARTSHORN, G.; PERALTA, R. 1985. Growth rates and age-size relationships of tropical wet forest trees in Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*. 1:97-100.
- LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A.; PAULUS, J.L.H. 1977. *Hidrología para ingenieros*. Segunda edición. McGraw Hill, México. 386p.
- LULL, K.J.; TINDALL, J.A.; POTTS, D.F. 1995. Assessing nonpoint-source pollution risk. *Journal of Forestry* 93 (1):35-40.
- MALMER, A.; GRIP, H. 1990. Soil disturbance and loss of infiltrability caused by mechanized and manual extraction of tropical rainforest in Sabah, Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 38:1-12.
- McBRATNEY A.B.; WEBSTER, R. 1986. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*. 37: 617-639.
- MEGAHAN, F.W.; SCHWEITHELM, J. 1983. Guidelines for reducing negative impacts of logging. *In* Hamilton, L.S.; King, P.N. *Tropical forested watersheds. Hydrologic and soils responses to major uses or conversions*. Westview Press, Boulder, Colorado, USA. Apendix C. p 143-154.
- MIRANDA, E. M. de. 1993. Efectos del aprovechamiento de un bosque húmedo tropical sobre el microambiente y su influencia en la regeneración de sitios perturbados. Tesis Mag. Sc., Turrialba, Costa Rica. CATIE. 164p.
- MONTGOMERY, D. C. 1991. *Diseño y análisis de experimentos*. Grupo Editorial Iberoamericana. México. D.F. 589 p.
- MOSLEY, P.M.; McKERCHAR, A. I. 1993. Streamflow. *In* Maidment, D.R. *Handbook of Hydrology*. McGraw Hill, New York, USA. p. 8.1-8.39.
- NUSSBAUM, R.; ANDERSON, J; SPENCER, T. 1995. Effects of selective logging on soil characteristics and growth of planted dipterocarp seedlings in Sabah. *In* Primack, R.B.; Lovejoy, T.E. (eds.) *Ecology, conservation and management of Southern Asis Rainforest*. Yale University Press, New Haven, Connecticut, USA. p 105-115.
- POELS, R.L.H. 1989a. Hydrology of a tropical rain forest in Suriname. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 37:379-382.

- \_\_\_\_\_. 1989b. Nutrient input and output in undisturbed and silviculturally treated tropical rain forest in Suriname. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 37:383-386.
- PUTZ, F. E. 1994. Towards a sustainable forest: how can forest be managed in a way that satisfies criteria of sustainability ?. *Tropical Forest Update*. 4(3):7-9.
- RAPERA, B.R. 1978. Effects of logging on residual stands. *In* Proceedings of the symposium on the long-term effects of logging in Southeast Asia. Biotrop, Bogor, Indonesia. Biotrop Special Publication No. 3. p 119-125.
- RODRIGUEZ, O.; MAYER, B. 1984. Extracción de trozas mediante bueyes y tractores agrícolas. Estudio FAO: Montes N° 49. 104 p.
- SETYABUDI, A. 1994. Communication: Design of an optimum forest road network using GIS and linear programming. *ITC Journal*, 1994-2.
- STADTMÜLLER, T. 1994. Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo. Turrialba, Costa Rica. CATIE. Proyecto Silvicultura de Bosques Naturales. Colección Silvicultura y Manejo de Bosques Naturales No. 10. 64p.
- TOSI, J. A. 1988. Antecedentes y recomendaciones para el documento de identificación de un proyecto sobre manejo forestal y áreas silvestres. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica. 15 p.
- UHL, C.; GUIMARÃES, V.I.C. 1989. Ecological impacts of selective logging in the Brazilian Amazon: a case study from the Paragominas Region of the State of Para. *Biotropica*, 21(2):98-106.
- VELASQUEZ, S.M. 1994. Curso sistemas de información geofigura. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Programa Manejo Integrado de Recursos Naturales, Area de Manejo de Cuencas. Turrialba, Costa Rica. 164 p.
- VERISSIMO, A.; BARRETO, P.; MATTOS, M.; TARIFA, R.; UHL, C. 1992 Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old Amazon frontier: the case of Paragominas. *Forest Ecology and Management*, 55:169-199.
- WEBSTER, R.; BURGESS, T. M.; 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III changing drift and universal kriging. *Journal of Soil Science*. 31:505-524.
- WEN H.S.; JULIEN, P.Y. 1993. Erosion and sediment transport. *In* Maidment, D.R. *Handbook of Hidrology*. McGraw Hill, New York, USA. p. 12.1-12.61.

- WHITE, L.J.T. 1994. The effects of commercial mechanized selective logging on a transect in lowland rainforest in the Lopé Reserve, Gabon. *Journal of Tropical Ecology* 10:313-322.
- ZULKIFLI, Y.; ANHAR, S. 1994. Effects of selective logging methods on suspended solids concentration and turbidity level in streamwater. *Journal of Tropical Forest Science* 7(2):199-219.

**ANEXO I: Base de datos utilizada en el análisis de regresión múltiple para la identificación de variables que afectan el rendimiento del arrastre (ver sección 5.2.1). Información levantada en el bloque I de aprovechamiento.**

Número de árbol	Troza	Largo (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Condiciones del aprovechamiento						Tiempo consumido durante las operaciones de aprovechamiento (minutos)					
				Distancia de arrastre al patio (m)	Distancia de arrastre a la vía principal (m)	Ponderada con signo	Ponderada valores absolutos	Valores con signo	Valores absolutos	Arrastre	Acomodo troza en el patio	Soltado troza en el patio	Viaje vacío	Viaje cargado	Ciclo completo de arrastre
9002	1	14.95	2.08	141.62	104.81	-0.02	0.04	-0.03	0.04	2.12	0.83	0.38	3.00	5.12	6.30
9005	1	17.15	2.08	105.95	69.14	0.01	0.01	0.01	0.01	1.32	1.18	0.82	1.08	2.40	4.40
9008	1	16.37	1.71	115.58	78.77	0.01	0.01	0.01	0.01	1.82	0.52	1.58	1.70	3.52	5.60
9009	1	13.00	1.57	197.39	160.59	0.00	0.01	0.00	0.01	1.90	1.60	0.72	5.22	7.12	9.40
9009	2	6.80	1.21	197.39	160.59	0.00	0.01	0.00	0.01	2.50	0.73	0.48	1.95	4.45	5.70
9011	1	11.90	1.08	204.28	154.86	0.01	0.01	0.00	0.01	1.67	0.97	0.47	2.23	3.90	5.30
9012	1	14.10	1.33	156.53	119.73	0.01	0.01	0.00	0.01	2.05	1.77	0.82	4.80	6.85	9.40
9013	1	14.50	1.43	191.67	154.86	0.01	0.01	0.00	0.01	2.33	0.97	0.47	2.53	4.86	6.30
9015	1 y 2	13.21	1.58	191.67	154.86	0.01	0.01	0.00	0.01	2.17	1.08	0.57	2.70	4.87	6.50
9018	1	8.95	1.62	259.86	223.04	0.00	0.01	0.00	0.01	2.60	0.67	0.53	3.97	6.57	7.80
9027	1	9.27	1.71	322.51	251.06	0.00	0.01	0.00	0.01	3.12	0.80	0.82	4.83	7.95	9.60
9030	1	14.03	2.35	340.10	251.06	0.00	0.01	0.00	0.01	4.12	0.83	1.10	7.67	11.79	13.70
10002	1	14.50	1.35	65.20	38.21	0.00	0.03	0.00	0.03	1.40		1.12	4.93	6.33	7.50
10006	1	8.50	0.78	81.00	51.01	-0.01	0.03	-0.02	0.04	2.38		1.87	2.95	5.33	7.20
10006	2	8.30	0.63	81.00	51.01	-0.01	0.03	-0.02	0.04	3.25		0.35	2.75	6.00	6.40
10008	1	15.10	2.24	52.90	44.39	-0.01	0.03	-0.01	0.04	1.20		0.62	1.97	3.17	3.80
10011	1	10.00	0.78	109.10	79.11	0.00	0.03	-0.01	0.04	1.85		1.05	2.15	4.00	5.10
10013	1	10.00	0.83	109.10	79.11	0.00	0.03	-0.01	0.04	1.95		0.88	3.23	5.18	6.10
10014	1	12.00	1.40	125.10	79.11	0.00	0.03	-0.01	0.04	4.60		5.27	2.52	7.12	12.40
10022	1	6.00	0.77	172.20	142.23	-0.01	0.03	-0.02	0.04	2.58		1.18	2.05	4.63	5.80
10022	2	8.00	0.84	172.20	142.23	-0.01	0.03	-0.02	0.04	1.68		1.02	2.67	4.35	5.40
10023	1	7.00	1.29	199.40	136.01	0.00	0.03	-0.01	0.03	2.57		0.60	3.40	5.97	6.60
10023	2	5.00	0.58	199.40	136.01	0.00	0.03	-0.01	0.03	2.42		0.93	4.83	7.25	8.20
10025	1	14.25	1.71	231.70	201.73	-0.01	0.03	-0.02	0.03	1.88		3.90	3.08	4.96	9.00
10027	1	12.40	1.67	241.90	205.11	-0.01	0.03	-0.02	0.03	3.78		0.75	4.47	8.25	10.60

Número de árbol	Troza	Largo (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Condiciones del aprovechamiento						Tiempo consumido durante las operaciones de aprovechamiento (minutos)					
				Distancia de arrastre al patio (m)	Distancia de arrastre a la vía principal (m)	Pendiente promedio de la vía de transporte menor				Arrastre	Acomodo troza en el patio	Solado troza en el patio	Viaje vacío	Viaje cargado	Ciclo completo de arrastre
						Ponderada con signo	Ponderada valores absolutos	Valores con signo	Valores absolutos						
10028	1	6.97	1.55	241.90	201.73	-0.01	0.03	-0.02	0.03	5.77		0.88	3.45	9.22	10.10
10028	2	10.75	1.39	241.90	201.73	-0.01	0.03	-0.02	0.03	4.08		0.92	2.43	6.51	7.40
75015	1	17.77	1.66	264.55	227.74	0.01	0.01	0.01	0.01	2.28		0.68	2.52	4.80	5.50
75021	1	15.40	1.93	219.99	183.18	0.01	0.01	0.01	0.01	2.83	1.97	0.33	3.22	6.05	8.40
75023	1	15.40	1.71	219.99	183.18	0.01	0.01	0.01	0.01	1.70		0.53	2.83	4.53	5.10
75026	1	15.05	2.24	212.77	175.96	0.00	0.02	-0.01	0.02	2.97	1.88	2.22	3.12	6.09	10.20
75029	1	12.30	1.96	212.77	175.96	0.00	0.02	-0.01	0.02	2.77	0.52	0.88	4.30	7.07	8.50
75033	1	11.30	2.85	141.62	183.18	0.01	0.01	0.01	0.01	1.82	1.05	0.75	2.15	3.97	5.80
76005	1	7.00	1.32	154.50	124.49	0.00	0.03	-0.01	0.03	2.47		0.90	3.03	5.50	6.40
76005	2	7.00	0.86	154.50	124.49	0.00	0.03	-0.01	0.03	1.92		0.50	1.80	3.72	4.20
76006	1	10.18	0.92	177.30	147.32	0.00	0.03	-0.01	0.03	3.12		0.72	4.75	7.87	8.60
76006	2	6.92	0.80	177.30	147.32	0.00	0.03	-0.01	0.03	3.68		0.70	1.83	5.51	6.20
76007	1	10.77	1.32	217.70	171.63	0.00	0.03	0.00	0.03	2.23	0.57	0.43	2.50	4.73	5.70
76008	1	12.50	1.76	217.70	187.69	0.00	0.02	0.00	0.03	3.03		0.98	3.67	6.70	7.70
76009	1	13.70	2.07	218.50	188.49	0.00	0.02	-0.01	0.03	3.38	0.60	0.95	2.83	6.21	7.80
76010	1	13.50	2.21	227.90	197.91	0.00	0.02	-0.01	0.03	3.65	1.25	1.28	3.08	6.73	9.30
76011	1	14.60	2.12	239.20	209.23	0.00	0.02	-0.01	0.03	4.73	1.22	0.83	5.23	9.96	12.00
77003	1	9.80	1.65	89.50	52.35	-0.04	0.06	-0.02	0.05	4.27		0.83	7.83	12.10	12.90
10019	1	13.00	1.36	166.00	136.01	0.00	0.03	-0.01	0.03	6.63		1.37	4.15	10.78	12.20
10020	1	11.00	0.88	166.00	154.80	-0.02	0.04	-0.02	0.04	15.07		0.92	7.33	22.40	23.30
10020	2	7.00	0.92	166.00	154.80	-0.02	0.04	-0.02	0.04	11.08		1.20	3.03	14.11	15.30
77009	1	6.70	0.87	123.40	126.21	-0.09	0.10	-0.09	0.10	4.37		3.10	5.82	10.19	13.30
77009	2	7.40	0.92	123.40	126.21	-0.09	0.10	-0.09	0.10	12.78		1.80	2.72	15.50	17.30
77009	3	7.80	0.65	123.40	126.21	-0.09	0.10	-0.09	0.10	13.20		2.35	2.87	16.07	18.40
77011	1	11.90	1.30	123.40	126.21	-0.09	0.10	-0.09	0.10	31.32		2.42	4.45	35.77	38.20
9026	1	14.17	1.72	309.83	272.60	-0.01	0.02	-0.01	0.02	22.02	0.78	0.60	4.88	26.90	28.30

**ANEXO 2: Base de datos utilizada en el análisis de regresión múltiple para la identificación de variables que afectan el rendimiento en la extracción (ver sección 5.2.2). Información levantada en el bloque I de aprovechamiento.**

Número de árbol	Troza	Volumen (m <sup>3</sup> )	Distancia de extracción (m)	Pendiente de extracción (%)	Angulo de extracción (grados)	Angulo de caída (grados)	Tiempo consumido en la extracción (minutos)
9002	1	2.0811	6.53	-13.5	18	73.5	8.03
9005	1	2.0751	11.55	1.0	77.5	33	18.93
9008	1	1.7129	21.00	-2.0	12.5	12.5	32.10
9009	1	2.7779	0.00	0.0	47	47	7.70
9011	1	1.0772	0.00	0.0	114.5	114.5	5.23
9015	1 y 2	1.5831	0.00	0.0	42	42	5.57
9018	1	1.6162	16.27	-12.5	6	15.5	16.90
10001	1	1.1118	11.60	-1.5	42.2	110	13.82
10002	1	1.3534	0.00	0.0	41	41	0.57
10006	1	0.7826	7.00	-7.0	41	110	14.43
10006	2	0.6257	7.00	-7.0	41	110	3.25
10008	1	2.2449	23.55	-14.5	11	40	26.50
10011	1	0.7793	0.00	0.0	42	42	3.52
10013	1	0.8296	0.00	0.0	77	77	7.65
10014	1	1.3970	21.26	-14.5	78	99	19.22
10019	1	1.3603	0.00	0.0	29	29	3.02
10022	2	0.8371	21.66	-17.0	26	224	3.55
10022	1	0.7729	21.66	-17.0	26	224	6.78
10027	1	1.6732	8.60	-7.0	33.5	4.5	7.07
10028	2	1.3883	24.36	-19.0	53	70	34.47
10028	1	1.5523	24.36	-19.0	53	70	19.88
75015	1	1.6612	0.00	0.0	3.5	3.5	4.72
75020	1	1.6346	0.00	0.0	73	73	10.12
75021	1	1.9304	19.88	-8.5	25.5	8.5	17.50
75023	1	1.7054	25.03	-8.7	25.5	16.5	17.82
75026	1	2.2367	26.28	-22.8	30	32	18.88
75029	1	1.9562	12.20	-17.5	30	17	17.92
75033	1	2.8482	30.84	-20.5	0.95	41.5	40.18
76005	1	1.3200	9.68	2.0	18	4	22.03
76005	2	0.8578	9.68	2.0	18	4	6.60
76006	1	1.7167	0.00	0.0	66.5	66.5	1.73
76007	1	1.3198	0.00	0.0	37	37	8.32
76008	1	1.7566	0.00	0.0	2	2	2.47
76009	1	2.0689	0.00	0.0	51	51	6.23
76010	1	2.2096	24.64	-2.0	14	1	12.45
76011	1	2.1153	24.15	-9.0	100	39.5	12.97

**ANEXO 3: Base de datos utilizados en la comparación pareada de t realizada para ilustrar el efecto del error en el levantamiento topográfico de los datos sobre el ajuste del modelo de elevación digital del bloque 2 del área experimental.**

Punto	Coordenadas del punto de validación		Elevación levantada en el campo (m)	Elevación estimada con el MED de la poligonal corregida (m)	Elevación estimada con el MED de la poligonal NO corregida (m)
	Este (m)	Norte (m)			
1	4721.57	5238.84	4.54	4.48	14.29
2	4704.14	5241.58	5.84	5.88	17.23
3	4720.34	5226.56	4.34	4.29	14.67
4	4718.80	5222.58	4.45	4.46	15.29
5	4712.15	5202.61	4.47	4.48	16.00
6	4700.45	5187.86	4.08	4.08	15.45
7	4722.04	5178.31	6.43	6.35	17.63
8	4693.73	5196.21	3.88	3.71	14.38
9	4709.31	5169.36	6.41	6.44	18.38
10	4688.04	5168.56	3.69	3.31	15.44
11	4700.48	5167.30	5.54	5.43	17.92
12	4697.82	5163.32	6.13	6.32	19.61
13	4688.19	5142.20	7.92	8.13	24.85
14	4674.73	5145.48	5.19	5.22	17.65
15	4731.92	5127.08	11.22	11.27	25.83
16	4728.42	5101.27	10.34	10.43	29.26
17	4715.98	5092.90	7.52	7.52	27.43
18	4719.32	5034.32	7.91	7.89	25.02
19	4821.35	5083.72	9.33	9.41	8.02
20	4852.87	5131.43	3.26	3.13	1.37
21	4856.46	5161.08	4.40	4.37	2.00
22	4865.56	5163.08	6.60	6.80	4.88
23	4848.57	5194.29	5.19	5.27	2.79
24	5024.35	5045.90	5.43	5.39	5.66
25	5010.54	5099.85	8.43	8.46	9.75
26	5002.05	5107.01	9.70	10.73	11.99
27	4998.74	5137.23	6.97	7.03	7.08
28	4637.75	5244.82	10.10	10.69	17.58
29	4614.54	5214.24	12.47	12.48	21.22
30	4628.21	5220.60	12.16	12.37	20.38
31	4637.14	5210.11	10.96	10.92	17.24
32	4671.35	5200.93	7.36	7.49	15.65
33	4663.32	5192.17	6.94	6.90	13.05
34	4634.28	5189.95	9.44	9.48	15.09
35	4612.42	5195.25	11.44	11.54	18.34
36	4645.52	5159.02	1.83	1.67	4.10
37	4620.07	5163.20	3.85	3.89	5.13
38	4649.60	5137.73	0.00	-0.30	5.08
39	4655.86	5052.16	8.92	9.13	17.91
40	4791.43	5059.95	11.60	11.64	10.05
41	4736.91	5056.67	9.60	9.68	16.73
42	4755.42	5113.70	12.22	12.25	12.08
43	4762.27	5117.72	12.06	11.95	9.66
44	4744.56	5156.71	11.12	11.14	13.53
45	4800.26	5191.79	6.24	6.32	5.01
46	4741.67	5169.13	10.14	10.27	14.01

Punto	Coordenadas del punto de validación		Elevación levantada en el campo (m)	Elevación estimada con el MED de la poligonal corregida (m)	Elevación estimada con el MED de la poligonal NO corregida (m)
	Este (m)	Norte (m)			
47	4955.18	5029.59	7.67	7.69	0.87
48	4954.84	5034.40	8.13	8.14	1.48
49	4897.49	5029.92	6.14	5.89	-6.76
50	4942.86	5042.63	9.22	9.07	0.27
51	4907.47	5026.15	6.80	6.84	-5.90
52	4888.84	5022.27	6.11	6.08	-4.06
53	4929.29	5150.61	12.15	12.23	7.92
54	4956.57	5150.06	8.40	8.29	4.28
55	4931.50	5192.16	10.62	10.80	6.11
56	4908.65	5188.40	9.57	9.55	7.24
57	4920.64	5200.94	10.03	10.13	10.43
58	4941.86	5141.97	11.68	11.73	6.90
59	4939.90	5134.51	12.29	12.43	7.00
60	4958.06	5117.75	12.29	13.05	8.26
61	4967.09	5115.82	11.72	12.60	10.33
62	4992.61	5122.93	9.38	10.12	11.22
63	5006.19	5124.12	9.53	11.14	11.06
64	5017.28	5110.81	9.23	10.75	11.52
65	5022.06	5058.03	6.67	7.05	8.00
66	5015.14	5051.61	6.58	6.91	7.68
67	4998.26	5037.54	6.20	6.33	7.83
68	4989.36	5029.57	6.09	6.29	6.55
69	4967.98	5025.82	8.03	9.41	4.51
70	4953.13	5017.12	5.93	5.77	-3.09
71	4944.53	5011.56	5.84	6.12	-3.78
72	4927.62	5014.53	5.39	5.21	-6.65
73	4712.17	5240.17	4.93	4.85	16.07
74	4717.65	5241.76	4.63	4.41	15.02
75	4724.28	5229.97	4.09	3.78	13.01
76	4729.81	5222.05	4.05	3.51	11.54
77	4740.16	5203.64	5.25	4.63	10.31
78	4737.51	5182.37	7.33	6.79	12.44
79	4738.48	5166.51	9.33	8.73	14.16
80	4742.67	5154.17	10.66	10.25	14.14
81	4745.54	5143.19	11.44	11.22	13.48
82	4747.40	5135.21	11.58	11.25	11.40
83	4760.19	5115.82	11.71	11.27	9.44
84	4765.88	5110.14	11.57	10.85	8.56
85	4770.93	5096.43	11.18	9.97	7.74
86	4774.43	5084.39	11.02	9.67	7.40
87	4776.98	5079.11	11.45	10.65	8.13
88	4786.56	5072.05	11.45	10.89	9.00
89	4803.83	5060.45	10.44	10.14	8.62
90	4814.72	5052.86	9.86	10.04	8.54
91	4829.46	5027.19	8.29	8.54	7.02
92	4828.94	5018.87	7.51	7.34	5.90
93	4841.89	5020.06	7.73	7.86	6.37



**ANEXO 4: Base de datos utilizados en la comparación empírica del ajuste de tres diferentes técnicas de interpolación utilizadas en la construcción del modelo de elevación digital del bloque 2 del área experimental.**

Punto	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	Kriging ordinario parámetros experimentales		Kriging ordinario parámetros por omisión		Método de la curva mínima		Método de distancia inversa	
				Elevación (m)	Residuo (m)	Elevación (m)	Residuo (m)	Elevación (m)	Residuo (m)	Elevación (m)	Residuo (m)
1	4721.57	5238.84	4.54	4.43	-0.10	4.48	-0.06	4.59	0.05	4.43	-0.11
2	4704.14	5241.58	5.84	5.97	0.13	5.88	0.03	5.67	-0.17	5.91	0.07
3	4720.34	5226.56	4.34	4.31	-0.03	4.29	-0.05	4.29	-0.05	4.24	-0.10
4	4718.80	5222.58	4.45	4.49	0.04	4.46	0.01	4.50	0.05	4.42	-0.03
5	4712.15	5202.61	4.47	4.47	-0.01	4.48	0.01	4.47	-0.01	4.32	-0.15
6	4700.45	5187.86	4.08	4.05	-0.03	4.08	-0.01	4.06	-0.02	3.82	-0.27
7	4722.04	5178.31	6.43	6.31	-0.12	6.35	-0.08	5.97	-0.46	6.41	-0.02
8	4693.73	5196.21	3.88	3.70	-0.18	3.71	-0.17	3.71	-0.17	3.62	-0.26
9	4709.31	5169.36	6.41	6.43	0.02	6.44	0.03	6.45	0.05	6.46	0.05
10	4688.04	5168.56	3.69	3.29	-0.40	3.31	-0.38	3.54	-0.16	3.02	-0.67
11	4700.48	5167.30	5.54	5.44	-0.10	5.43	-0.10	5.52	-0.02	5.24	-0.30
12	4697.82	5163.32	6.13	6.36	0.23	6.32	0.18	6.54	0.41	6.31	0.18
13	4688.19	5142.20	7.92	8.13	0.21	8.13	0.21	8.31	0.39	8.10	0.19
14	4674.73	5145.48	5.19	5.22	0.03	5.22	0.03	5.29	0.10	5.18	-0.01
15	4731.92	5127.08	11.22	11.23	0.01	11.27	0.05	11.18	-0.04	11.51	0.28
16	4728.42	5101.27	10.34	10.38	0.04	10.43	0.09	10.46	0.11	10.55	0.20
17	4715.98	5092.90	7.52	7.53	0.01	7.52	-0.00	7.54	0.01	7.44	-0.08
18	4719.32	5034.32	7.91	7.92	0.01	7.89	-0.02	7.93	0.02	7.90	-0.01
19	4821.35	5083.72	9.33	9.44	0.11	9.41	0.08	9.48	0.14	9.40	0.07
20	4852.87	5131.43	3.26	3.17	-0.09	3.13	-0.13	3.34	0.08	3.03	-0.23
21	4856.46	5161.08	4.40	4.40	0.01	4.37	-0.02	4.16	-0.24	4.29	-0.11
22	4865.56	5163.08	6.60	6.84	0.23	6.80	0.20	6.62	0.02	6.95	0.35
23	4848.57	5194.29	5.19	5.20	0.01	5.27	0.08	5.39	0.20	5.21	0.02
24	5024.35	5045.90	5.43	5.39	-0.05	5.39	-0.05	5.41	-0.02	5.39	-0.04
25	5010.54	5099.85	8.43	8.46	0.03	8.46	0.03	8.45	0.02	8.44	0.01
26	5002.05	5107.01	9.70	10.77	1.08	10.73	1.03	10.57	0.87	11.06	1.37
27	4998.74	5137.23	6.97	7.02	0.05	7.03	0.06	7.15	0.18	7.05	0.08
28	4637.75	5244.82	10.10	10.40	0.30	10.69	0.59	10.81	0.71	10.51	0.41
29	4614.54	5214.24	12.47	12.44	-0.03	12.48	0.01	12.44	-0.02	12.55	0.08
30	4628.21	5220.60	12.16	12.36	0.20	12.37	0.22	12.24	0.08	12.52	0.36
31	4637.14	5210.11	10.96	10.92	-0.04	10.92	-0.05	11.13	0.16	11.06	0.10
32	4671.35	5200.93	7.36	7.55	0.18	7.49	0.12	7.50	0.14	7.43	0.06
33	4663.32	5192.17	6.94	6.88	-0.06	6.90	-0.04	6.50	-0.44	6.65	-0.29
34	4634.28	5189.95	9.44	9.46	0.02	9.48	0.04	9.39	-0.04	9.49	0.05
35	4612.42	5195.25	11.44	11.55	0.11	11.54	0.10	11.43	-0.01	11.59	0.16
36	4645.52	5159.02	1.83	1.63	-0.20	1.67	-0.16	2.02	0.19	1.59	-0.24
37	4620.07	5163.20	3.85	3.91	0.06	3.89	0.04	4.17	0.31	3.80	-0.05
38	4649.60	5137.73	0.00	-0.23	-0.23	-0.30	-0.30	-0.28	-0.28	-0.49	-0.49
39	4655.86	5052.16	8.92	9.09	0.17	9.13	0.21	9.07	0.15	9.05	0.13
40	4791.43	5059.95	11.60	11.64	0.04	11.64	0.04	11.66	0.06	11.67	0.07
41	4736.91	5056.67	9.60	9.73	0.14	9.68	0.09	9.51	-0.09	9.65	0.06
42	4755.42	5113.70	12.22	12.23	0.01	12.25	0.03	12.21	-0.01	12.30	0.08
43	4762.27	5117.72	12.06	11.93	-0.13	11.95	-0.11	11.97	-0.09	12.14	0.07
44	4744.56	5156.71	11.12	11.12	0.00	11.14	0.02	11.19	0.07	11.33	0.21

Punto	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	Kriging ordinario parámetros experimentales		Kriging ordinario parámetros por omisión		Método de la curva mínima		Método de distancia inversa	
				Elevación (m)	Residuo (m)	Elevación (m)	Residuo (m)	Elevación (m)	Residuo (m)	Elevación (m)	Residuo (m)
45	4800.26	5191.79	6.24	6.31	0.07	6.32	0.07	6.46	0.22	6.32	0.08
46	4741.67	5169.13	10.14	10.26	0.12	10.27	0.12	9.99	-0.15	10.26	0.12
47	4955.18	5029.59	7.67	7.69	0.02	7.69	0.02	7.73	0.06	7.68	0.01
48	4954.84	5034.40	8.13	8.14	0.00	8.14	0.00	8.19	0.06	8.19	0.06
49	4897.49	5029.92	6.14	5.89	-0.25	5.89	-0.25	5.67	-0.47	5.90	-0.24
50	4942.86	5042.63	9.22	9.05	-0.16	9.07	-0.14	9.30	0.08	9.17	-0.05
51	4907.47	5026.15	6.80	6.88	0.08	6.84	0.04	6.57	-0.23	6.87	0.07
52	4888.84	5022.27	6.11	6.08	-0.03	6.08	-0.03	6.07	-0.04	6.03	-0.07
53	4929.29	5150.61	12.15	12.23	0.09	12.23	0.08	12.16	0.01	12.31	0.16
54	4956.57	5150.06	8.40	8.30	-0.10	8.29	-0.11	8.35	-0.06	8.07	-0.33
55	4931.50	5192.16	10.62	10.80	0.18	10.80	0.17	10.77	0.15	10.87	0.25
56	4908.65	5188.40	9.57	9.56	-0.01	9.55	-0.02	9.53	-0.03	9.63	0.07
57	4920.64	5200.94	10.03	10.12	0.09	10.13	0.10	10.05	0.03	10.07	0.04
58	4941.86	5141.97	11.68	11.71	0.02	11.73	0.04	11.81	0.12	12.12	0.44
59	4939.90	5134.51	12.29	12.46	0.18	12.43	0.14	12.61	0.33	13.57	1.28
60	4958.06	5117.75	12.29	12.64	0.36	13.05	0.76	12.66	0.37	14.63	2.35
61	4967.09	5115.82	11.72	12.23	0.51	12.60	0.89	12.07	0.36	14.19	2.48
62	4992.61	5122.93	9.38	10.16	0.78	10.12	0.74	9.89	0.52	10.96	1.58
63	5006.19	5124.12	9.53	11.13	1.60	11.14	1.60	10.95	1.42	11.01	1.48
64	5017.28	5110.81	9.23	10.66	1.43	10.75	1.52	10.19	0.97	10.39	1.17
65	5022.06	5058.03	6.67	7.02	0.36	7.05	0.39	7.23	0.56	7.22	0.56
66	5015.14	5051.61	6.58	6.90	0.32	6.91	0.33	7.18	0.60	7.11	0.53
67	4998.26	5037.54	6.20	6.36	0.16	6.33	0.13	6.69	0.49	6.07	-0.13
68	4989.36	5029.57	6.09	6.39	0.29	6.29	0.20	6.50	0.40	6.02	-0.07
69	4967.98	5025.82	8.03	9.45	1.42	9.41	1.38	9.40	1.37	8.95	0.91
70	4953.13	5017.12	5.93	5.80	-0.13	5.77	-0.15	5.88	-0.04	5.35	-0.57
71	4944.53	5011.56	5.84	6.17	0.34	6.12	0.29	6.53	0.69	5.20	-0.64
72	4927.62	5014.53	5.39	5.23	-0.16	5.21	-0.18	5.34	-0.05	5.18	-0.21
73	4712.17	5240.17	4.93	4.86	-0.07	4.85	-0.08	5.05	0.12	4.83	-0.09
74	4717.65	5241.76	4.63	4.35	-0.28	4.41	-0.22	4.57	-0.06	4.41	-0.22
75	4724.28	5229.97	4.09	3.79	-0.30	3.78	-0.31	3.82	-0.27	3.58	-0.51
76	4729.81	5222.05	4.05	3.72	-0.33	3.51	-0.54	3.61	-0.44	3.28	-0.76
77	4740.16	5203.64	5.25	5.45	0.20	4.63	-0.62	4.63	-0.62	4.60	-0.65
78	4737.51	5182.37	7.33	7.08	-0.25	6.79	-0.54	6.40	-0.93	7.02	-0.31
79	4738.48	5166.51	9.33	8.69	-0.63	8.73	-0.59	8.48	-0.85	9.04	-0.29
80	4742.67	5154.17	10.66	10.22	-0.45	10.25	-0.41	10.34	-0.33	10.60	-0.06
81	4745.54	5143.19	11.44	11.10	-0.34	11.22	-0.22	11.35	-0.09	12.38	0.94
82	4747.40	5135.21	11.58	11.13	-0.45	11.25	-0.33	11.35	-0.23	12.47	0.89
83	4760.19	5115.82	11.71	11.24	-0.48	11.27	-0.45	11.25	-0.47	11.40	-0.31
84	4765.88	5110.14	11.57	10.67	-0.90	10.85	-0.72	10.76	-0.81	11.25	-0.32
85	4770.93	5096.43	11.18	9.70	-1.48	9.97	-1.21	9.83	-1.35	10.64	-0.55
86	4774.43	5084.39	11.02	9.54	-1.48	9.67	-1.35	9.57	-1.45	10.18	-0.84
87	4776.98	5079.11	11.45	10.63	-0.82	10.65	-0.81	10.55	-0.91	11.32	-0.14
88	4786.56	5072.05	11.45	10.99	-0.46	10.89	-0.56	10.80	-0.65	11.53	0.08
89	4803.83	5060.45	10.44	10.07	-0.37	10.14	-0.30	9.95	-0.49	10.43	-0.01
90	4814.72	5052.86	9.86	9.86	-0.00	10.04	0.18	9.82	-0.04	10.48	0.62
91	4829.46	5027.19	8.29	8.42	0.13	8.54	0.25	8.48	0.19	8.82	0.53
92	4828.94	5018.87	7.51	7.34	-0.17	7.34	-0.17	7.38	-0.13	7.40	-0.12
93	4841.89	5020.06	7.73	7.84	0.11	7.86	0.13	7.83	0.09	7.81	0.08

	Elevación (m)	Kriging ordinario parámetros experimentales		Kriging ordinario parámetros por omisión		Método de la curva mínima		Método de distancia inversa	
		Elevación (m)	Residuo	Elevación (m)	Residuo	Elevación (m)	Residuo	Elevación (m)	Residuo
Promedios	8.01	8.01		8.02		8.01		8.12	
Sumatoria de residuos			0.44 m		1.18 m		0.27 m		10.56 m
Residuo promedio sin signo			0.26 m		0.27 m		0.29 m		0.35 m
Índice residual normalizado			0.03		0.03		0.04		0.04
Error cuadrático medio			0.44 m		0.44 m		0.45 m		0.58 m

**ANEXO 5: Información utilizada en la comparación del impacto del aprovechamiento forestal entre bloques 1 y 2 de aprovechamiento.**

BLOQUE	SUBPARCELA	Número de árboles cortados por subparcela	Longitud de vías de transporte menor en la subparcela (m)	Metros de cable utilizados por subparcela (m)
1	7	0	0	11
1	8	1	0	19.21
1	9	1	31.87	11.7
1	10	2	95.47	18.25
1	11	1	3.16	32.81
1	19	1	0	15.03
1	20	1	0	22.32
1	21	0	78.48	0
1	22	4	63.42	16.14
1	23	4	13.6	26.17
1	24	2	42.62	0
1	26	2	7.62	18.03
1	27	2	115.27	21.93
1	28	3	59.8	8.54
1	29	2	90.94	23.65
1	30	3	21.93	25.59
1	34	1	0	0
1	35	2	49.48	25.35
1	36	4	67.77	7.28
1	37	3	0	0
1	38	3	52.3	0
1	45	1	62.36	16.55
1	46	1	51.15	0
1	47	0	0	0
1	51	1	27.94	8.06
1	52	0	34.92	16.03
1	61	1	0	0
1	62	1	11	23.43
2	67	0	48.87	0
2	77	3	82.81	0
2	78	1	43.28	5.13
2	79	4	96.21	7.17
2	81	1	32.88	6.7
2	82	0	0	0
2	83	4	30.25	11.77
2	84	3	57.12	0
2	85	1	21.01	15.9
2	86	2	2.4	11.51
2	87	2	76.27	5.05
2	88	2	53.16	16.5
2	89	1	82.91	0
2	91	0	0	0
2	92	1	8.46	0
2	93	2	103.87	14.74
2	94	2	47.37	17.71
2	100	1	24.47	47.54

BLOQUE	SUBPARCELA	Número de árboles cortados por subparcela	Longitud de vías de transporte menor en la subparcela (m)	Metros de cable utilizados por subparcela (m)
2	105	2	50.58	21.92
2	106	1	0	0
2	107	0	42.96	0
2	109	1	0	0
2	111	1	0	0
2	145	2	65.5	5
2	146	0	12.86	0
2	159	0	56.63	0
2	161	0	70.88	1.2
2	162	2	11.91	17.5

**ANEXO 6: Información utilizada en la comparación del rendimiento de la operación arrastre entre los bloques 1 y 2 de aprovechamiento.**

BLOQUE	ARBOL	TROZA	Tiempo consumido en el arrastre (minutos)	Distancia de arrastre (m)	Pendiente media de la vía de transporte menor (%)
1	9002	1	2.12	141.62	2.6
1	9005	1	1.32	105.95	0.6
1	9008	1	1.82	115.58	0.7
1	9009	1	1.90	197.39	0.3
1	9009	2	2.50	197.39	0.3
1	9011	1	1.67	204.28	0.4
1	9012	1	2.05	156.53	0.4
1	9013	1	2.33	191.67	0.4
1	9015	1 y 2	2.17	191.67	0.4
1	9018	1	2.60	259.86	0.1
1	9026	1	22.02	309.83	1.3
1	9027	1	3.12	322.51	0.1
1	9030	1	4.12	340.10	0.1
1	10002	1	1.40	65.20	0.4
1	10006	1	2.38	81.01	1.7
1	10006	2	3.25	81.01	1.7
1	10008	1	1.20	52.87	1.4
1	10011	1	1.85	109.11	0.9
1	10013	1	1.95	109.11	0.9
1	10014	1	4.60	125.14	0.9
1	10019	1	6.63	166.00	1.3
1	10020	1	15.07	166.00	2.5
1	10020	2	11.08	166.00	2.5
1	10022	1	2.58	172.22	1.8
1	10022	2	1.68	172.22	1.8
1	10023	1	2.57	199.45	1.3
1	10023	2	2.42	199.45	1.3
1	10025	1	1.88	231.73	1.6
1	10027	1	3.78	241.91	1.6
1	10028	1	5.77	241.91	1.6
1	10028	2	4.08	241.91	1.6
1	75015	1	2.28	264.55	0.7
1	75021	1	2.83	219.99	0.5
1	75023	1	1.70	219.99	0.5
1	75026	1	2.97	212.77	1.0
1	75029	1	2.77	212.77	1.0
1	75033	1	1.82	141.62	0.5
1	76005	1	2.47	154.48	0.7
1	76005	2	1.92	154.48	0.7
1	76006	1	3.12	177.31	0.5
1	76006	2	3.68	177.31	0.5
1	76007	1	2.23	217.69	0.2
1	76008	1	3.03	217.69	0.1
1	76009	1	3.38	218.49	0.6
1	76010	1	3.65	227.90	0.7
1	76011	1	4.73	239.23	0.7
1	77003	1	4.27	89.54	2.1

BLOQUE	ARBOL	TROZA	Tiempo consumido en el arrastre (minutos)	Distancia de arrastre (m)	Pendiente media de la vía de transporte menor (%)
1	77009	1	4.37	123.41	8.8
1	77009	2	12.78	123.41	8.8
1	77011	1	31.32	123.41	8.8
2	13034	1	2.60	286.15	2.0
2	13034	2	3.27	286.15	2.0
2	13041	2	2.98	285.18	1.8
2	13044	1	2.97	285.18	1.8
2	13044	2	3.05	285.18	1.8
2	14004	1	8.83	337.20	0.6
2	14005	1	4.28	325.97	0.2
2	14006	1	4.35	347.85	0.8
2	15003	1	1.45	92.51	1.3
2	15004	1	0.85	95.30	0.6
2	15006	1	1.78	152.62	2.6
2	15010	1	1.37	181.12	1.8
2	15010	2	1.52	181.12	1.8
2	57053	1	3.82	325.74	1.2
2	57053	2	3.25	325.74	1.2
2	59013	1	3.75	262.85	2.5
2	59016	1	3.42	278.48	2.4
2	59017	1	3.35	278.82	2.0

**ANEXO 7: Información utilizada en la comparación del rendimiento de la operación extracción entre los bloques 1 y 2 de aprovechamiento.**

BLOQUE	ARBOL	TROZA	Tiempo consumido en la extracción (minutos)	Longitud de cable utilizada en la extracción (m)	Pendiente de extracción (%)
2	12009	1	1.93	6.67	9.0
2	13034	1	14.77	0.00	0.0
2	13041	1	2.65	5.54	0.0
2	13044	2	2.95	5.54	0.0
2	14004	1	12.45	6.28	23.0
2	14005	1	5.95	8.13	13.5
2	14006	1	3.33	11.96	8.0
2	15003	1	5.03	0.00	0.0
2	15004	1	13.88	19.20	1.0
2	15006	1	2.02	0.00	0.0
2	15010	1	7.20	5.82	16.5
2	57044	1	3.72	0.00	0.0
2	57049	1	4.78	0.00	0.0
2	57050	1	7.62	0.00	0.0
2	57051	1	7.17	7.18	5.4
2	57053	1	4.90	12.38	16.0
2	59013	1	2.23	0.00	0.0
2	59016	1	3.20	9.20	1.0
2	59017	1	8.82	7.05	2.5
1	9002	1	8.03	6.53	13.5
1	9005	1	18.93	11.55	1.0
1	9008	1	32.10	21.00	2.0
1	9009	1	7.70	0.00	0.0
1	9011	1	5.23	0.00	0.0
1	9015	1 y 2	5.57	0.00	0.0
1	9018	1	16.90	16.27	12.5
1	10001	1	13.82	11.60	1.5
1	10002	1	0.57	0.00	0.0
1	10006	1	14.43	7.00	7.0
1	10006	2	3.25	7.00	7.0
1	10008	1	26.50	23.55	14.5
1	10011	1	3.52	0.00	0.0
1	10013	1	7.65	0.00	0.0
1	10014	1	19.22	21.26	14.5
1	10019	1	3.02	0.00	0.0
1	10022	2	3.55	21.66	17.0
1	10022	1	6.78	21.66	17.0
1	10027	1	7.07	8.60	7.0
1	10028	2	34.47	24.36	19.0
1	10028	1	19.88	24.36	19.0
1	75015	1	4.72	0.00	0.0
1	75020	1	10.12	0.00	0.0
1	75021	1	17.50	19.88	8.5
1	75023	1	17.82	25.03	8.7
1	75026	1	18.88	26.28	22.8
1	75029	1	17.92	12.20	17.5
1	76005	1	22.03	9.68	2.0
1	76005	2	6.60	9.68	2.0
1	76006	1	1.73	0.00	0.0
1	76007	1	8.32	0.00	0.0
1	76008	1	2.47	0.00	0.0
1	76009	1	6.23	0.00	0.0
1	76010	1	12.45	24.64	2.0
1	76011	1	12.97	24.15	9.0