



**UNIVERSIDAD DE TALCA**

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES  
ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL

**MODELO DE PROGRAMACION ENTERA MIXTA  
PARA LA DETERMINACION OPERATIVA DE  
LOS NIVELES DE ACOPIO EN CANCHA, ESTABILIZADO  
Y CONSTRUCCION DE CAMINOS**



RONALD CORDERO G.

Tesis para optar al grado de:  
INGENIERO FORESTAL

Profesor Guía: DARÍO AEDO O.  
Ingeniero Forestal, M.Sc.

TALCA - CHILE  
1997

A mis padres Deyanira Gómez B. y Guillermo Cordero N.  
quienes no dijeron con plena alegría y satisfacción "trabajo  
cumplido" hasta el día en que vieron finalizada esta tesis.

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta tesis no podría haber sido finalizada sin la guía y ayuda de las siguientes personas que de alguna u otra forma contribuyeron en su realización. Darío Aedo, como profesor guía, me proporcionó pautas siempre claras por donde encausar el desarrollo de mi trabajo. A Carlos Obreque, M. Sc. Ingeniero Matemático de la Universidad de Talca, por proporcionarme mucho de su valioso tiempo en apoyo técnico y conceptual. A André Laroze, Ph. D. Director Ingeniería Forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile, por guiarme en temas claves de mi tesis. A Andrés Weintraub, Ph. D. Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Chile, por facilitarme con diligencia material teórico que de alguna manera sirvió como base de esta tesis. A Carlos Sierra, Gerente de Desarrollo de Forestal y Agrícola Monteáguila S.A., por las todas las facilidades otorgadas para la realización de este estudio. Finalmente, a Dios por darme la paciencia y la convicción de que podía hacerlo.

**A TODOS ELLOS,  
GRACIAS.**

UNIVERSIDAD DE TALCA  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

El alumno Sr. RONALD ALEXIS CORDERO GÓMEZ, ha realizado la Tesis "MODELO DE PROGRAMACIÓN ENTERA MIXTA PARA LA DETERMINACIÓN OPERATIVA DE LOS NIVELES DE ACOPIO EN CANCHA, ESTABILIZADO Y CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS", como uno de los requisitos para optar al Grado de Licenciado en Ciencias Forestales con el Profesor Sr. Darío Aedo Ortíz, como Profesor Guía.

La Comisión de Calificación constituida por los Profesores Sres.: Darío Aedo Ortíz, Rodolfo Neuenschwander Alvarado y Carmen Bravo Castillo evaluó con un 7,0 (en letras) Siete.

TALCA, CHILE  
1997



  
OSCAR SANTIAGO VALLEJOS BARRA  
DIRECTOR  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

## ÍNDICE

RESÚMEN	v
SUMMARY	vi
I.- INTRODUCCIÓN.....	1
II.- OBJETIVOS.....	3
III.- ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	
3.1.- Problema del costo fijo o carga fija.....	4
3.2.- Análisis de redes.....	5
3.3.- Programación entera.....	7
3.3.1.- Programación entera-pura.....	8
3.3.2.- Programación entera-mixta.....	8
3.3.3.- Programación entera-binaria.....	8
3.4.- Heurísticas adaptadas a redes o a programación matemática.....	10
IV.- METODOLOGÍA	
4.1.- Antecedentes generales de la empresa.....	11
4.2.- Materiales.....	11
4.2.1.- Base de datos de transporte.....	12
4.2.2.- Base de datos de cosecha.....	12
4.2.3.- Base de datos de caminos.....	12
4.2.4.- Base de datos proveniente del Sistema de Información Geográfico.....	13
4.3.- Descripción del modelo particular.....	13
4.4.- Descripción del modelo general.....	14
4.5.- Determinación de las variables de decisión del modelo particular.....	14
4.6.- Función Objetivo del modelo particular.....	15
4.7.- Identificación conceptual y matemática de las restricciones para el modelo particular.....	16
4.8.- Generación del modelo de programación entera-mixta para el caso particular.....	16
4.9.- Generación de un modelo de programación entera-mixta para el caso general.....	16
4.10.- Verificación del modelo particular.....	17
V.- RESULTADOS.	
5.1.- Índices.....	18

5.2.- Variables de decisión.....	18
5.3.- Coeficientes de costos.....	20
5.4.- Vector de recursos.....	22
5.5.- Restricciones.....	23
5.6.- Función objetivo.....	32
 VI.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	
6.1.- Análisis de la restricción de demanda mínima de invierno.....	36
6.2.- Análisis de la restricción sobre construcción de caminos.....	36
6.3.- Análisis sobre la capacidad de flujo en los arcos de caminos.....	37
6.4.- Solución computacional.....	38
6.5.- Verificación de los resultados.....	39
6.6.- Modelo general.....	41
6.7.- Implementación computacional.....	42
 VII.- CONCLUSIONES.....	43
 VIII.- BIBLIOGRAFÍA.....	44
APÉNDICE N°1.....	46
APÉNDICE N°2.....	60
APÉNDICE N°3.....	67
APÉNDICE N°4.....	76
APÉNDICE N°5.....	78
APÉNDICE N°6.....	80
APÉNDICE N°7.....	82

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla N°1. Solución óptima para las variables enteras de construcción de caminos según los niveles asumidos por las variables $FLUJO^1_{ni,nf}$ y $FLUJO^2_{ni,nf}$ .....	37
Tabla N°2. Selección de rodales según niveles de demanda mínima durante la temporada de invierno.....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura N°1. Representación de una situación forestal real.....	6
Figura N°2. Representación de la Figura N°1 por medio de una red.....	6
Figura N°3. Esquematización de los nodos centro de masa.....	26
Figura N°4. Esquematización del flujo desde uno o más nodos o rodales hacia un nodo destino.....	27
Figura N°5. Esquematización del flujo desde un nodo origen hacia un nodo destino.....	28
Figura N°4. Esquematización del flujo desde nodos origen hacia nodos destino.....	28



## RESÚMEN

El presente trabajo aborda el problema de integrar las actividades de transporte, cosecha y caminos (construcción y mantención) en la planificación forestal de corto plazo; de manera tal de poder determinar cuales serán los niveles óptimos de inversión de acopio en cancha y de inversión en caminos.

Se desarrolló un modelo de programación lineal entera mixta con el patrocinio de Forestal y Agrícola Monteáguila S.A. El modelo propuesto considera conjuntamente, en dos temporadas (verano e invierno), las principales actividades de producción (cosecha, transporte y caminos). Así, el modelo permite conocer cual será el origen y destino de la madera y cuales serán las rutas seleccionadas por donde tendrá lugar el flujo de ésta asegurando un mínimo costo total.

Utilizando el modelo propuesto se resolvió un problema forestal real. Los resultados muestran que éste tiende a minimizar la selección de rutas para el transporte durante la temporada de invierno. Además, en esta temporada, el modelo tiende a seleccionar los rodales que están más cerca de los destinos debido a los mayores costos involucrados en las actividades de invierno.

## SUMMARY

This Thesis report deals with the problem of integrating the logs transporting, harvesting and road building and maintenance activities in short-term forest planning. The aim of this analysis is to provide a useful tool to support decisions related to determine the optimum investment levels in log yard and roads.

To do this, a mixed integer linear programming model was formulated with the support of Forestal y Agrícola Monteáguila S.A. The model considers the main forest production activities (harvesting, hauling and roads) in two harvesting seasons (summer and winter). It lets to know which is the wood source and its destination, and which will be the selected routes to transport logs that ensure a minimum total cost.

A real forest problem was solved using the proposed model. Its results, in general terms, show that the model tends to minimize the winter routes used and to select the closest stands in relation to the destinations, because of higher costs involved in this season.

## I.- INTRODUCCIÓN.

El manejo eficiente del *recurso forestal*, desde un punto de vista operativo, es de una alta complejidad; ya que muchas de las decisiones que deben tomarse consideran gran cantidad de variables y combinación de opciones. Por ejemplo, el escenario de habilitar un predio para ser cosechado aborda decisiones tales como: ¿dónde ubicar las torres de maderero y sus respectivas áreas de tributación?, ¿qué áreas se cosecharán con skidders?, ¿por dónde efectuar el trazado de nuevos caminos y la habilitación de caminos contiguos?. Todas estas decisiones resultan ser complejas.

Para llegar a un nivel de confiabilidad en que las decisiones que se tomarán son las mejores, la modelación (representación aproximada de la realidad) constituye una herramienta analítica que facilita, generalmente con apoyo computacional, la toma de decisiones.

Las empresas forestales nacionales, en este contexto, han decidido incursionar en los horizontes de planificación de largo y mediano plazo con éxito, optimizando el valor actual neto de sus proyectos y asegurando el abastecimiento continuo de sus plantas industriales. Sin embargo, en el corto plazo existe una escasa implementación de modelos de decisión debido a su mayor complejidad; ya que, a diferencia del largo y mediano plazo, aquí se trabaja en un mínimo de agregación de la información, lo que genera una gran cantidad de variables y opciones de decisión.

Como ejemplo, la empresa Forestal y Agrícola Monteáguila S.A. posee una estructura de planificación jerárquica apoyada en modelos decisionales que consideran los niveles estratégico y táctico; sin embargo, a nivel operativo se carece de dichas herramientas. Es así, como se ha querido incursionar en este nivel para resolver un problema tipo de corto plazo que considera actividades de cosecha, transporte y caminos.

En este contexto, la acumulación o acopio de madera en cancha surge por razones de continuidad en el abastecimiento de una planta industrial, cuellos de botella en los sistemas de producción, transporte y recepción en el destino final, mantener un cierto stock de seguridad para los periodos siguientes, o

simplemente por razones estratégicas. Lo cierto es que el uso de canchas genera un costo extra no despreciable.

Debido a que no siempre son claras las ventajas de acumular o acopiar madera, más aun si se piensa que este costo puede ser invertido en una mejora de la red de caminos al interior del patrimonio de la compañía, resulta de mucho valor el poder contar con un modelo que permita establecer los niveles adecuados de acopio y de inversión en caminos.

El modelo desarrollado incorpora la información generada a nivel táctico integrando ahora, como planificación operativa, las actividades anuales de cosecha, transporte y caminos según temporada verano e invierno, permitiendo conocer los orígenes de la madera (a nivel de producto-rodal), los destinos de ella (cancha de acopio, cancha de proceso o destino final), las rutas seleccionadas por donde se realizará el flujo de madera, los caminos en proyecto seleccionados para construcción y los caminos existentes seleccionados para mantención.

Para el desarrollo del presente trabajo se contó con el apoyo de Forestal y Agrícola Monteáguila S.A. quien aportó la información necesaria, que ha sido distorsionada para mantener su confidencialidad, pero que de ninguna manera atenta contra los resultados aquí expuestos, para modelar un problema particular de producción forestal. Además su formulación matemática se hace extensiva a problemas de carácter general.

## **II.- OBJETIVOS.**

### **2.1.- Objetivo General:**

Formular e implementar un modelo matemático general que determine la mejor combinación, en términos económicos, de los niveles de acopio en cancha, estabilizado y construcción de caminos.

### **2.2.- Objetivo Específico:**

Determinar las variables de decisión y restricciones a nivel de los problemas particular y general presentados.

### III.- ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.

Debido a la creciente demanda de productos forestales, se requiere disponer de una metodología que permita planificar en forma dinámica la utilización óptima del recurso forestal. Tal metodología debiera considerar aspectos estratégicos, tales como niveles de oferta, demanda y precios; aspectos tácticos, tales como compra de predios, construcción de caminos, abastecimiento; y aspectos operativos, tal como secuencias de intervenciones. Además, tal metodología deberá ser apropiada para el grado de complejidad que implica un patrimonio que evoluciona (Laroze et al., 1988).

Paredes (1988) menciona que no siempre son claras las ventajas de acumular madera durante los meses de verano para dosificarla durante el invierno, al menos desde un punto de vista económico. En este contexto, Paredes (1988) expone que *“la acumulación excesiva en cancha implica costos que bien pueden superar el supuesto ahorro en construcción o estabilizado de caminos”*; y además, *“los costos que involucra la formación de stock en cancha pueden hacer atractivas las inversiones en mejoramiento de la red de caminos”*.

#### 3.1.- Problema del costo fijo o carga fija.

La construcción, mantención y mejoramiento de los estándares de los caminos junto con la determinación de patrones eficientes de transporte son temas relevantes en la planificación forestal (Weintraub y Navon, 1986).

A menudo, cuando se emprende una actividad, es bastante común incurrir en una *carga fija* o *costo fijo* conocido como el *costo de preparación*. Este costo lo constituye la construcción y mantención de caminos forestales. Debido a la inclusión de este *costo fijo* se requiere un análisis tipo programación entera-mixta (Hillier y Lieberman, 1982).

La inclusión de la variable *caminos* implica que se está considerando en el problema un costo fijo independiente del nivel de producción, lo que a su vez hace que el problema sea complejo y de naturaleza combinatoria (Paredes, 1988).

Según Dykstra (1984), una condición del modelo de programación lineal es que el valor de la función objetivo debe ser proporcional a los niveles de las variables continuas en la solución. Sin embargo, en ciertas oportunidades existe un costo fijo asociado a un nivel de actividad violando en consecuencia el supuesto de linealidad de la programación lineal.

Esta situación puede ser abordada con técnicas de programación lineal entera-mixta, en donde conjuntamente se evalúan variables enteras y continuas (Dykstra, 1984).

Básicamente, las técnicas más utilizadas para resolver problemas de programación matemática son tres: análisis de redes, programación entera y heurísticas adaptadas a redes o a programación matemática.

### 3.2.- Análisis de redes.

Todo problema que puede ser representado a través de una red puede ser resuelto por medio de análisis de redes. Ahora, si se piensa que la solución al problema puede ser encontrada a través de la determinación de la ruta de menor costo que deberá seguir el flujo de madera desde el bosque hacia los destinos intermedios o finales, el problema bien puede ser representado y resuelto utilizando redes (Paredes, 1988).

Utilizar redes implica reconocer *nodos* (puntos de unión) y *ramas* o *arcos* que unen pares de nodos consecutivos y a través de los cuales pasa un determinado *flujo* (Hillier y Lieberman, 1982).

Una red típica en el sector forestal está compuesta de nodos (rodiales, canchas, destinos finales, puntos de intersección de caminos), arcos (generalmente asociados a segmentos de caminos) y flujos (cantidad de madera que pasa a través de los arcos) como se aprecia en la Figura N°1.

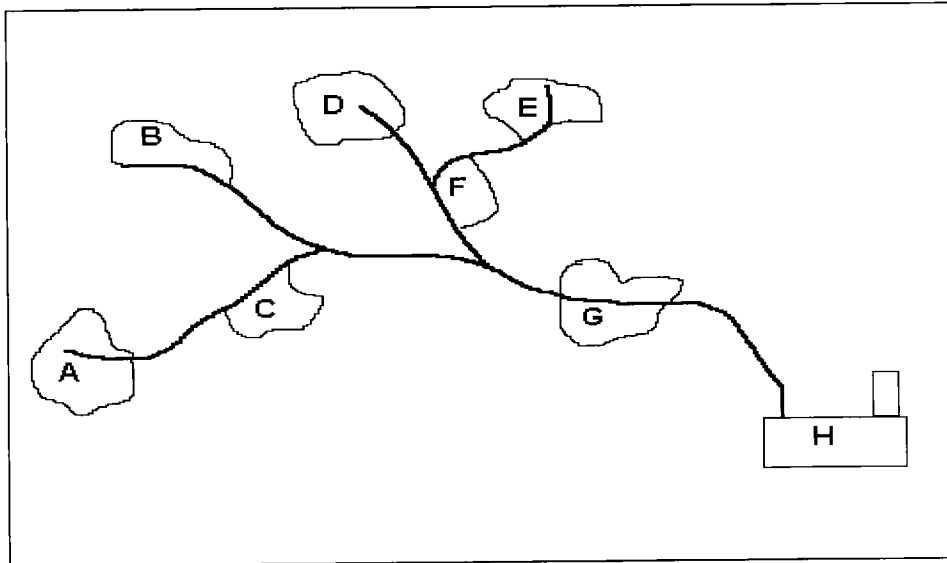


Figura N°1. Representación de una situación forestal real.

En la Figura N°1 las letras A a la G representan rodales u orígenes de la madera, mientras que la letra H representa la planta industrial o destino final.

La representación de esta situación por medio de una red se aprecia en la Figura N°2.

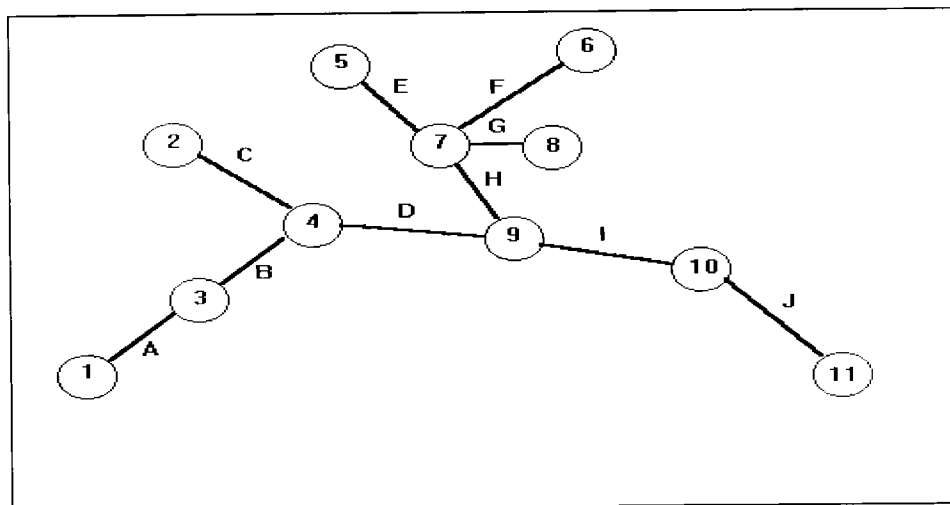


Figura N°2. Representación de la Figura N°1 por medio de una red.



Aquí, los nodos 1, 2, 3, 5, 6, 8 y 10 representan los rodales de la Figura N°1. Los nodos 4, 7 y 9 representan intersecciones de caminos en donde se acumula el flujo proveniente de los nodos inmediatamente precedentes. Los arcos A al J representan los segmentos de caminos. De manera especial, el arco G es un arco artificial que no denota un segmento de camino, sino que permite representar el flujo existente desde el nodo 8 (rodal F en la Figura N°1) hacia la intersección de camino representada por el nodo 7.

### 3.3.- Programación entera.

Esta técnica de optimización se utiliza para resolver problemas prácticos importantes que requieren de soluciones enteras. Situaciones de este tipo son las decisiones relacionadas con la construcción de obras de infraestructuras, la asignación de personal a distintas tareas y la selección de proyectos de inversión, donde una solución fraccional no tiene sentido (Laroze, 1996).

Una variación de la programación entera es el de la programación enteramixta, en donde sólo algunas variables pueden tener valores discretos mientras que otras pueden tomar valores continuos (Laroze, 1996). Sin embargo, el gran número de variables continuas y enteras que pueden generarse en algunos problemas los hacen de difícil solución (Weintraub, 1975).

Si las variables enteras sólo pueden tomar los valores 0-1 entonces nos encontramos frente a una forma específica llamada programación entera-binaria (Laroze, 1996). Estas variables 0-1 suelen estar asociadas a problemas que consideran variables de inversión (Winston, 1991), como es el caso de la construcción o mejora de la red de caminos.

Con frecuencia hay que enfrentar decisiones en que las únicas opciones de respuesta son *si* o *no* (Hillier y Lieberman, 1982). En este problema particular, las decisiones pasan por definir, por ejemplo, si construir o estabilizar un camino o no hacerlo; cosechar el rodal *i* en la temporada *t* o no cosecharlo. Estas son variables binarias que pueden tomar los valores 0 ó 1.

La estructura matemática, según Laroze (1996), para las distintas formas de programación entera son las siguientes:

3.3.1.-Programación entera-pura: Toda las variables de decisión deben asumir valores enteros (por ejemplo: asignación de tareas).

$$X_j \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad \forall_j$$

3.3.2.-Programación entera-mixta: Algunas variables de decisión pueden tomar valores discretos mientras que otras pueden tomar valores continuos; por ejemplo, determinar cuántas fábricas construir (variable entera) y la producción de cada fábrica (variable continua).

$$X_i \geq 0 \quad \forall_i ; X_j \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad \forall_j$$

3.3.3.-Programación entera-binaria: Algunas variables enteras sólo pueden asumir los valores 0 y 1; por ejemplo, decisiones del tipo *si o no*.

$$X_i \geq 0 \quad \forall_i ; X_j \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad \forall_j ; X_k \in \{0, 1\} \quad \forall_k$$

Debido a que estos problemas no pueden ser considerados como lineales es necesario realizar una comparación de las soluciones lineales y enteras.

- a) La solución entera corresponde a un punto interior de la región factible del problema equivalente de programación lineal. No es una solución básica.
- b) Dado que el problema entero es más restrictivo que la versión lineal, el número de alternativas factibles que es posible seleccionar es menor. Por consiguiente, la solución del problema entero nunca será mejor que la solución del problema lineal.
- c) No siempre es posible o recomendable definir una solución entera por aproximación de la solución óptima del problema lineal.

d) En general, obtener la solución de un problema de programación entera requiere de un esfuerzo computacional considerablemente mayor que su versión lineal equivalente.

La formulación del problema de costo fijo, según Laroze (1996), es la siguiente.

Para comenzar a realizar una actividad productiva es necesario incurrir en un costo fijo de preparación. Si  $x_j$  corresponde al nivel de producción,  $c_j$  al costo variable unitario y  $f_j$  al costo fijo, entonces el problema se puede formular de la siguiente manera (donde  $y_j$  es una variable binaria y  $\alpha_j$  es un valor suficientemente grande):

$$\text{Minimizar: } \sum_j c_j x_j + \sum_j f_j y_j$$

$$\text{Sujeto a: } x_j - \alpha_j y_j \leq 0 \quad \forall_j$$

$$x_j \geq 0 ; y_j \in \{0, 1\} \quad \forall_j$$

Uno de los mayores problemas prácticos que presenta la programación entera son los tiempos computacionales invertidos para obtener las soluciones.

Cuando los problemas consideran más de 100 variables enteras, y en algunos casos bien se puede llegar a 300 variables, resulta casi imposible resolverlos sin costos computacionales elevados (Paredes, 1988).

Weintraub (1994) menciona algunos casos en donde el tiempo computacional invertido en la resolución de problemas es excesivo. Por ejemplo, Nelson y Brodie (1989) desarrollaron un modelo de optimización con restricciones espaciales o de adyacencia más restricciones de caminos que generaba 740 restricciones y 300 variables. El tiempo computacional necesario para resolver este modelo fue 60 horas utilizando un computador 80386.

### 3.4.- Heurísticas adaptadas a redes o a programación matemática.

La complejidad que pueden tener algunos problemas enteros de gran tamaño hacen atractivo utilizar heurísticas aplicadas a redes (Paredes, 1988) como la utilizada por Weintraub et al. (1991).

Las heurísticas son un conjunto de reglas para la toma de decisiones que se descubren, casi siempre mediante prueba y error, para resolver problemas. En ocasiones estas reglas llegan tan cerca que casi dan una solución óptima a los problemas matemáticos, en cambio en otras ocasiones no son tan confiables (Schroeder, 1992).

La heurística se utiliza para resolver problemas de toma de decisiones cuando no se dispone de técnicas óptimas o éstas son demasiado molestas o costosas (Schroeder, 1992).

En general una heurística puede ser utilizada para proporcionar una primera solución entera y a partir de esta solución utilizar programación entera (Cplex, 1994). En este contexto, se han aplicado técnicas heurísticas para simplificar el problema original, para luego modelarlo por programación entera-mixta como lo realizado en los trabajos de Weintraub et al. (1994) y Guignard et al. (1993).

En la práctica, la heurística en ocasiones lleva a soluciones mejoradas muy confiables para problemas de toma de decisiones, aun cuando no se pueda alcanzar una solución óptima. (Schroeder, 1992).

No obstante la existencia de estas complejas técnicas de programación matemática, ya no es necesario conocerlas en esencia, debido a que hoy en día existen muchos programas optimizadores, tales como LINDO, CPLEX, LINGO y WHAT'S BEST, capaces de resolver este tipo de problemas en forma rápida; por lo tanto, el encargado de tomar las decisiones ya no se aboca a la metodología de solución, sino que a la modelación de los problemas.

## IV.- METODOLOGÍA.

### 4.1.- Antecedentes generales de la empresa.

Forestal y Agrícola Monteágüila S.A. es una empresa forestal cuyo negocio es la producción de madera pulpable de Eucalyptus para abastecer a la planta de celulosa Forestal e Industrial Santa Fe S.A. ubicada en la comuna de Nacimiento, provincia de Bio-Bío.

Su patrimonio consta de aproximadamente 35.000 hectáreas de plantaciones jóvenes de Eucalyptus distribuidas entre la Octava región y norte de la Novena región.

Actualmente, su proceso de planificación cuenta con apoyo de modelos de optimización en sus niveles estratégico y táctico. A nivel operativo se pretende utilizar la información de mediano plazo (nivel táctico) para modelar el flujo conveniente de madera bosque-planta analizando conjuntamente las actividades de cosecha, transporte y caminos.

### 4.2.- Materiales.

Para el desarrollo del presente modelo de programación entera-mixta, la información necesaria que sería requerida por el modelo se estructura en bases de datos. Esta información está referida a costos de cosecha, transporte y caminos, más los costos generados en cancha por concepto de proceso o acopiado.

Se utilizará el software de optimización LINDO versión 5.3 para resolver el problema sobre un computador con coprocesador matemático 80486 de 100 MHz.

#### 4.2.1.- Base de datos de transporte:

Para el cálculo de las tarifas de transporte se utilizó un modelo tarifario tomando como referencia la utilización de un camión tipo (Freightliner SD-112) cuya configuración es doble puente con carro y capacidad para 29 toneladas (base  $m^3$ ).

Las tarifas de transporte fueron estimadas para cada uno de los rodales que intervienen en el problema, y sus unidades están dadas en dólares por metro cúbico de madera sólido sin corteza ( $US\$/m^3$ ).

#### 4.2.2.- Base de datos de cosecha:

Los costos de cosecha se estimaron a nivel de rodal utilizando Harvester y Forwarder en base a distancia promedio de madereo y topografía, sus unidades están dadas en dólares por metro cúbico de madera cosechada ( $US\$/m^3$ ).

#### 4.2.3.- Base de datos de caminos:

Se utilizaron los costos estándar de caminos diferenciados en: caminos de verano (tierra), caminos de invierno (ripio), mantención caminos de verano e invierno, caminos de verano llevados al estándar de invierno para ser utilizados en ambas temporadas, y costos de construcción de caminos de verano e invierno. Los costos señalados están dados en dólares por kilómetro ( $US\$/Km.$ )

#### 4.2.4.- Base de datos proveniente del Sistema de Información Geográfico:

A partir del Sistema de Información Geográfico se obtuvo la información referente a la identificación de los rodales seleccionados para cosecha y a sus volúmenes unitarios ( $m^3/ha$ ).

Se ploteará la red del problema identificando rodales, caminos existentes, proyectos de caminos y cancha de trozado o proceso. El plano en cuestión se encuentra en el Apéndice N°4.

Los volúmenes por rodal fueron proyectados al año 1996 utilizando modelos de crecimiento.

#### 4.3.- Descripción del modelo particular.

Se seleccionará una porción del patrimonio de la compañía ubicado en el sector precordillerano de la Octava región, sobre el cual se modelaría la selección de rodales para cosechar.

Este problema cuenta con las siguientes estadísticas generales.

- a) 27 rodales candidatos.
- b) Una cancha de proceso con capacidad de  $15.000 m^3$ .
- c) Una cancha de acopio con capacidad de  $20.000 m^3$ .
- d) Un destino final (planta industrial Santa Fe)
- e) Dos tipos de productos (pulpable trozo corto: 2,44 m de largo y pulpable trozo largo: 7,0 m de largo).

Junto con la definición del tamaño del problema se establecieron ciertas condiciones bajo las cuales se desarrolló el modelo:

- a) La cancha de acopio de verano sólo será abastecida durante la temporada de verano y con madera pulpable trozo corto.
- b) La cancha de trozado puede ser abastecida durante ambas temporadas, pero sólo con madera pulpable trozo largo.
- c) Hacia el destino final sólo puede llegar madera pulpable trozo corto
- d) Al término de una temporada la cancha de trozado debe quedar sin stock.
- e) Debido a que la madera que llega a una cancha de trozado es procesada y evacuada tan pronto como sea posible, la capacidad máxima puede ser ocupada dos veces en una temporada; ya que la madera no es acumulada.

#### 4.4.- Descripción del modelo general.

El modelo general es una extensión del modelo particular, en donde conjuntamente deben modelarse la utilización de distintos tipos de sistemas de cosecha (Harvester-Forwarder, Skidders y Torres de Madereo) y la incorporación de la madera de terceros como alternativa de abastecimiento.

#### 4.5.- Determinación de variables de decisión del modelo particular.

Las *variables de decisión* corresponden a los niveles de las actividades del problema sobre los cuales se deberán tomar decisiones económicas. Es así, como se definieron variables continuas y discretas (binarias, relativas a decisiones si o no).



Como el problema es de naturaleza *origen-destino* en el que se consideran 2 temporadas (verano e invierno), se definieron subíndices asociados a las variables de decisión. De esta manera, el problema fue modelado como un análisis de redes, pero resuelto utilizando programación entera-mixta.

Los coeficientes técnicos y de costo, que corresponden al valor unitario que poseen los niveles de las actividades o variables de decisión en las restricciones y función objetivo respectivamente, se obtuvieron de las bases de datos de cosecha, transporte y caminos.

El vector de recursos (también conocido como RHS por sus siglas en inglés *Righthand Side*), definido como aquellos recursos que están disponibles para ser ocupados por los niveles de las actividades o variables de decisión, corresponde a las proyecciones volumétricas de la oferta de madera que poseen los rodales, capacidades de las canchas de acopio y trozado, y las demandas mínimas por temporada.

#### 4.6.- Función objetivo del modelo particular.

Debido a que el objetivo de esta modelación es minimizar el costo total del sistema de producción (cosecha, transporte y actividades de caminos), la función objetivo quedará estructurada de la siguiente manera.

#### MINIMIZAR

$Z =$  Costo de Cosecha + Costo de Transporte + Costo de Caminos + Costo generado en cancha + Costo de Penalización por la Selección de Rodales en Invierno + Costo de Oportunidad del Capital.

Debido a que se privilegia (por menor costo) la cosecha de verano por sobre la de invierno, a cada rodal seleccionado en invierno se le asigna un *costo de penalización* que representa la diferencial de costo (aun no evaluada en forma práctica) que podría existir entre las actividades de transporte y cosecha por temporada.

#### 4.7.- Identificación conceptual y matemática de las restricciones para el problema particular.

En esta etapa, se definieron conceptualmente las restricciones, de manera tal que fuesen coherentes con el marco de situaciones reales dónde está inserto el problema, para luego así darles una estructura matemática.

Una vez definido el conjunto de restricciones que participan del problema se verificó cada una de ellas identificándose posibles restricciones redundantes, que no aportan información adicional al problema; conformando así, el conjunto de restricciones finales.

El paso siguiente consiste en dar una estructura matemática a cada una de las restricciones identificadas.

#### 4.8.- Generación del modelo de programación entera-mixta para el caso particular.

Esta etapa consiste en la formulación e implementación del problema utilizando para ello el software optimizador LINDO, su posterior ejecución y obtención de las soluciones.

#### 4.9.- Generación de un modelo de programación entera-mixta para el caso general.

Luego de confirmar la funcionalidad del modelo particular, se procedió a estructurar su extensión a problemas generales que aborden las decisiones de determinar los niveles de inversión en cancha, construcción y estabilizado o mantenimiento de caminos.

En esta etapa, se generó la estructura del modelo general identificando cada una de las variables y restricciones adicionales que participan de este problema.

#### 4.10.- Verificación del modelo particular.

La finalidad de esta etapa, es poder verificar la calidad de la información entregada por el modelo en cuanto a la coherencia y racionalidad de las soluciones. Además se analizan distintos resultados, con respecto a un problema base, según variaciones en los niveles de demandas mínimas de invierno.

En este sentido, se realizaron tres corridas del modelo en donde se analizaron los resultados utilizando tres niveles de demanda mínima de invierno. El problema base posee una demanda mínima de invierno de 35.000 m<sup>3</sup> y los dos restantes poseen demandas mínimas de 10.000 y 20.000 m<sup>3</sup>.

## V.- RESULTADOS

A continuación se describe la formulación matemática del problema particular:

### 5.1.- Índices:

Como el problema es de naturaleza *origen-destino* en el que se consideran 2 temporadas, se definieron índices asociados a las variables de decisión que se detallan a continuación:

$i$  = identificación del número de rodal;  $i = 1, \dots, 27$ .

$t$  = temporada de cosecha;  $t = 1, 2$ ; donde 1= verano y 2= invierno.

$n_i$  = nodo origen o inicial en la red del problema.

$n_f$  = nodo destino o final en la red del problema.

### 5.2.- Variables de decisión:

$VOLDF_i^t$  = volumen pulpable trozo corto del rodal "i" enviado al destino final en la temporada "t".

$VOLCA_i$  = volumen pulpable trozo corto del rodal "i" enviado a la cancha de acopio en la temporada de verano.

$VOLTR_i^t$  = volumen pulpable trozo largo del rodal "i" enviado a la cancha de trozado en la temporada "t".

ACOPDF = volumen de madera enviada desde la cancha de acopio al destino final en la temporada de invierno.

TRODF<sup>t</sup> = volumen de madera enviada desde la cancha de trozado al destino final durante la temporada "t".

TRACOP = volumen de madera enviada desde la cancha de trozado a la cancha de acopio en la temporada de verano.

FLUJO<sup>t</sup><sub>ni,nf</sub> = flujo que pasa a través del segmento de camino unido por el nodo origen "ni" y el nodo destino "nf" durante la temporada "t".

$I_i$  = variable binaria que impide que un rodal se coseche en ambas temporadas.

Es decir:

$$I_i \begin{cases} 1 & \text{si el rodal se cosecha en la temporada de invierno.} \\ 0 & \text{si se cosecha en la temporada de verano.} \end{cases}$$

$b_{ni,nf}^t$  = variable binaria que indica la temporada "t" en que es utilizado el segmento de camino en proyecto comprendido entre el nodo origen "ni" y el nodo destino "nf" (t=1 indica verano; t=2 indica invierno; y t=3 indica ambas temporadas).

Es decir:

$$b_{ni,nf}^1 \begin{cases} 1 & \text{si el arco de camino "ni-nf" se construye sólo para ser utilizado en verano.} \\ 0 & \text{si no se construye.} \end{cases}$$

$$b_{ni,nf}^2 \begin{cases} 1 & \text{si el arco de camino "ni-nf" se construye sólo para ser utilizado en invierno.} \\ 0 & \text{si no se construye.} \end{cases}$$

TROZDF <sup>t</sup>	= costo de transporte (US\$/m <sup>3</sup> ) desde la cancha de trozado hacia el destino final en la temporada "t".
TACOPDF	= costo de transporte (US\$/m <sup>3</sup> ) desde la cancha de acopio hacia el destino final en la temporada de invierno.
TNODO <sup>t</sup> <sub>ni,nf</sub>	= costo de transporte (US\$/ m <sup>3</sup> ) desde el nodo origen "ni" hasta el nodo destino "nf" en la temporada "t". Debido a la escala de este coeficiente (menor a una unidad), se utiliza amplificado por 100.
CCOS <sub>i</sub>	= costo de cosecha (US\$/m <sup>3</sup> ) del rodal "i".
CPEN	= costo de penalización (US\$) por la selección de un rodal en invierno
CACOP	= costo de la madera en la cancha de acopio (US\$/m <sup>3</sup> ).
CTROZ <sup>t</sup>	= costo generado en cancha de trozado (US\$/m <sup>3</sup> ) en la temporada "t".
CAPFLU <sub>ni,nf</sub>	= capacidad de flujo sobre el arco comprendido entre el nodo origen "ni" y el nodo destino "nf" (m <sup>3</sup> ).
CCAMVER <sub>ni,nf</sub>	= costo de construcción del segmento de camino de verano comprendido entre el nodo origen "ni" y el nodo destino "nf" (US\$).
CCAMINV <sub>ni,nf</sub>	= costo de construcción del segmento de camino de invierno comprendido entre el nodo origen "ni" y el nodo destino "nf" (US\$).
CVERINV <sub>ni,nf</sub>	= costo de construcción del segmento de camino comprendido entre el nodo origen "ni" y el nodo destino "nf", si el camino se utiliza durante ambas temporadas (costo de construcción camino de verano más costo asociado para subir su estándar a un camino de invierno, en US\$).
CMANT <sup>t</sup> <sub>ni,nf</sub>	= costo de mantenimiento del segmento de camino existente comprendido entre el nodo origen "ni" y el nodo destino "nf" durante la temporada "t" (US\$).

$$b_{ni,nf}^3 \begin{cases} 1 & \text{si el arco de camino "ni-nf" se construye para ser utilizado en ambas temporadas.} \\ 0 & \text{si no se construye.} \end{cases}$$

$R_{ni,nf}^t$  = variable binaria que indica si el segmento de camino existente, comprendido entre los nodos "ni-nf", se utiliza en la temporada "t".

Es decir:

$$R_{ni,nf}^1 \begin{cases} 1 & \text{si el arco de camino existente "ni-nf" se utiliza en verano.} \\ 0 & \text{si no se utiliza.} \end{cases}$$

$$R_{ni,nf}^2 \begin{cases} 1 & \text{si el arco de camino existente "ni-nf" se utiliza en invierno.} \\ 0 & \text{si no se utiliza.} \end{cases}$$

### 5.3.- Coeficientes de costos:

Los coeficientes de costos corresponden al valor unitario (costo o utilidad) que poseen las actividades o variables de decisión.

$TDFINAL_i^t$  = costo de transporte (US\$/m<sup>3</sup>) desde el rodal "i" hacia el destino final en la temporada "t".

$TACOP_i$  = costo de transporte (US\$/m<sup>3</sup>) desde el rodal "i" hacia la cancha de acopio en la temporada de verano.

$TTROZ_i^t$  = costo de transporte (US\$/m<sup>3</sup>) desde el rodal "i" hacia la cancha de trozado en la temporada "t".

$TTROZAC$  = costo de transporte (US\$/m<sup>3</sup>) desde la cancha de trozado hacia la cancha de acopio en la temporada de verano.

TD = tasa de descuento (%).

#### 5.4.- Vector de recursos:

El vector de recursos se define como aquellos recursos que están disponibles para que sean ocupados por los niveles de las actividades o variables de decisión.

- VOLTOT<sub>i</sub> = oferta total de volumen del rodal "i" (m<sup>3</sup>).
- DDAVER = volumen mínimo programado para ser cosechado durante la temporada de verano (m<sup>3</sup>).
- DDAINV = volumen mínimo programado para ser cosechado durante la temporada de invierno (m<sup>3</sup>).
- ACOPMAX = capacidad máxima de la cancha de acopio (m<sup>3</sup>).
- STOCKI = stock inicial de la cancha de acopio (m<sup>3</sup>).
- STOCKF = stock final de la cancha de acopio (m<sup>3</sup>).
- TROZMAX = capacidad máxima de la cancha de trozado (m<sup>3</sup>).



## 5.5.- Restricciones.

5.5.1.- El volumen por rodal-producto cosechado y enviado a destino final debe ser mayor o igual a una cierta demanda mínima por temporada.

Debido a que el problema es de minimización de costos, si los costos totales de verano son menores a los de invierno, es factible que la solución óptima concentre las actividades sólo en verano. Sin embargo, por la existencia de contratos con empresas contratistas, por la continuidad que deben tener las actividades durante el año y por la cantidad de maquinaria disponible para la cosecha, no resulta factible concentrar las actividades sólo en una temporada por lo que se deben fijar demandas mínimas a satisfacer.

a) Demanda mínima de verano.

$$\sum_{i=1}^{27} \text{VOLDF}_i^1 + \sum_{i=1}^{27} \text{VOLCA}_i + \sum_{i=1}^{27} \text{VOLTR}_i^1 \geq \text{DDAVER}$$

b) Demanda mínima de invierno.

$$\sum_{i=1}^{27} \text{VOLDF}_i^2 + \sum_{i=1}^{27} \text{VOLTR}_i^2 + \text{ACOPDF} \geq \text{DDAINV}$$

5.5.2.- El volumen cosechado por rodal debe ser igual a su oferta y debe ser cosechado íntegramente en una temporada. De esta manera, se evita lo que comúnmente se llama "picoteo"; es decir, dejar un cierto volumen en pie que estaría disponible para la temporada siguiente. Esto puede elevar los costos de cosecha y transporte si es que el volumen remanente es marginal.

a) Si el rodal se cosecha en verano se tiene:

$$\text{VOLDF}_i^1 + \text{VOLCA}_i + \text{VOLTR}_i^1 - \text{VOLTOT}_i * (1 - l_i) = 0 \quad ; \forall i$$

b) Si el rodal se cosecha en invierno se tiene:

$$\text{VOLDF}_i^2 + \text{VOLTR}_i^2 - \text{VOLTOT}_i * l_i = 0 \quad ; \forall i$$

5.5.3.- Capacidad máxima en las canchas de acopio durante la temporada de verano.

El volumen total que llega a la cancha de acopio (desde un rodal o desde la cancha de trozado) en la temporada de verano, debe ser menor o igual a la capacidad máxima que posee esa cancha descontado el posible stock inicial que pudiese existir en ella.

$$\sum_{i=1}^{27} \text{VOLCA}_i + \text{TRACOP} \leq \text{ACOPMAX} - \text{STOCKI}$$

5.5.4.- Capacidad máxima en las canchas de trozado.

Debido a que el volumen que llega a la cancha de trozado se procesa y se evacúa lo más rápido posible (no se acumula), la verdadera capacidad máxima de la cancha de trozado se asumirá el doble de su capacidad real.

$$\sum_{i=1}^{27} \text{VOLTR}_i^t \leq \text{TROZMAX} \quad ; \forall t$$

#### 5.5.5.- Conservación de volumen en la cancha de acopio.

El volumen acopiado en verano proveniente de un rodal y de la cancha de trozado debe ser evacuado íntegramente durante la temporada de invierno si no existe stock final. Si existe stock final sólo será evacuada la porción restante.

$$\sum_{i=1}^{27} \text{VOLCA}_i + \text{TRACOP} - \text{ACOPDF} = \text{STOCKF}$$

#### 5.5.6.- Conservación de volumen en la cancha de trozado.

El volumen de producto (pulpable trozo largo) que llega a la cancha de trozado debe salir por completo en esa misma temporada e inmediatamente después de trozado. Dicho volumen puede ir hacia la cancha de acopio o hacia destino final.

$$\sum_{i=1}^{27} \text{VOLTR}_i^t - \text{TRACOP} - \text{TRODF}^t = 0 \quad ; \quad \forall t$$

#### 5.5.7.- Conservación de flujo.

Debido a que el problema se abordó como una *red*, se definieron nodos ficticios en donde se acumula el volumen de madera proveniente de los rodales.

Los nodos definidos corresponden a rodales, intersecciones de camino, cancha de acopio, cancha de trozado y destino final.

Por otro lado, dado que el maderero se realiza hacia orilla de camino, el transporte tiene lugar en todo el segmento de camino hacia el cual el volumen es maderado; sin embargo, la madera se concentra en distinta proporción a lo largo de éste; por lo tanto, el punto medio para el transporte se encuentra en el punto medio de concentración de la madera (nodo centro de masa) y no en el punto medio de longitud del segmento o arco de camino (ver Figura N°3).

A partir de este punto o nodo se calculan las tarifas de transporte.

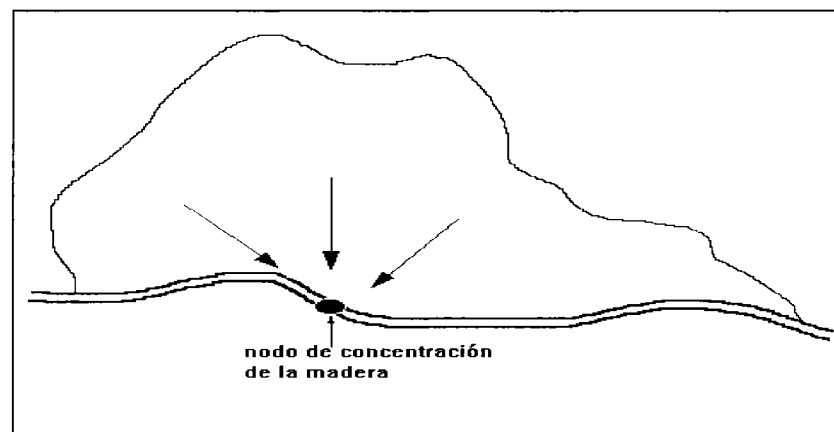


Figura N°3. Esquematación de los nodos centro de masa.

El nodo centro de masa se determinó asumiendo una distribución homogénea de volumen al interior del rodal y utilizando una red de puntos; así, el nodo centro de masa se encuentra aproximadamente en aquel punto que divide sectores de igual superficie. Al contar con un Sistema de Información Geográfica este punto puede determinarse, de manera automatizada, por medio de una aplicación desarrollada especialmente para estos efectos.

Debido a que el modelo debe ser capaz de seleccionar rutas o combinación de rutas óptimas para el transporte y a la vez identificar cual es el origen (rodal-producto) y el destino de la madera, se simplificó el problema definiendo una variable de flujo ( $FLUJO_{ni,nf}^t$ ) que se utiliza solamente para caracterizar el flujo dentro del predio, y que representa el flujo desde un nodo origen "ni" hacia un nodo destino "nf" durante la temporada "t". El coeficiente de costo de esta variable es el costo de transporte entre nodos ( $US\$/m^3$ ). Con esta variable es posible seleccionar rutas óptimas de transporte; sin embargo el origen (rodal-producto) de la madera es incierto hasta ahora.

Para representar el flujo desde la puerta del predio hasta los destinos (intermedios y final), y con el fin de poder establecer cual es el origen (rodal-producto) y destino de la madera, se utilizan las variables  $VOLDF_i^t$ ,  $VOLCA_i$  y  $VOLTR_i^t$

Como el sistema debe permanecer en equilibrio, todo el volumen que fluye hacia un nodo destino debe ser igual al volumen que sale de ese nodo.

Luego, se pueden visualizar tres situaciones que se detallan a continuación.

a) Volumen que fluye desde uno o más nodos origen (un nodo puede corresponder a un rodal) hacia un nodo destino:

Esquemáticamente esta situación puede ser representada de la siguiente manera:

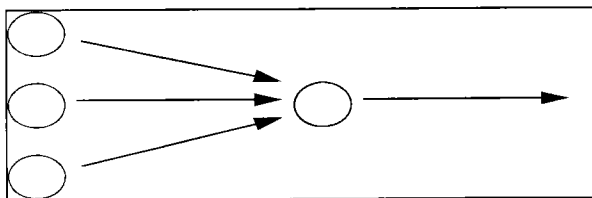


Figura N°4. Esquemática del flujo desde uno o más nodos o rodales hacia un nodo destino.

Algebraicamente la restricción queda estructurada de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^{27} VOLDF_i^t + \sum_{i=1}^{27} VOLCA_i + \sum_{i=1}^{27} VOLTR_i^t + \sum_{n_i \in C} FLUJO_{n_i, n_f}^t - FLUJO_{n_f, n_f+1}^t = 0 \quad ; \quad \forall t$$

donde  $C$  corresponde al conjunto de nodos origen.

b) Volumen que fluye desde un nodo origen hacia un nodo destino

Esquemáticamente esta situación puede ser representada de la siguiente manera:



Figura N°5. Esquematzación del flujo desde un nodo origen hacia un nodo destino.

Algebráicamente la restricción queda estructurada de la siguiente manera:

$$\text{FLUJO}_{ni,nf}^t - \text{FLUJO}_{nf,nf+1}^t = 0 \quad ; \quad \forall t$$

c) Volumen que fluye desde uno o más nodos origen hacia uno o más nodos destino:

Esquemáticamente esta situación puede ser representada de la siguiente manera:

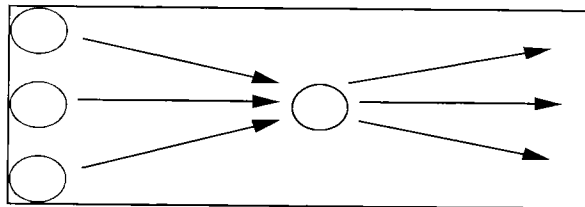


Figura N°6. Esquematzación del flujo desde nodos origen hacia nodos destino.

Algebraicamente la restricción queda estructurada de la siguiente manera:

$$\sum_{ni \in C} \text{FLUJO}_{ni,nf}^t - \sum_{nf' \in D} \text{FLUJO}_{nf,nf'}^t = 0 \quad ; \quad \forall t$$

donde  $D$  corresponde al conjunto de nodos destino.

### 5.5.8.- Utilización de caminos.

- a) Caminos existentes: los caminos, o segmentos de caminos existentes comprendidos entre nodos, pueden ser utilizados en ambas temporadas para acceder a uno o más rodales. Estos segmentos de caminos corresponden a variables binarias (0-1) que tienen asociado un costo fijo (mantención de la carpeta) diferenciado según temporada.

La restricción queda conceptualizada de la siguiente manera: el flujo de madera entre dos nodos debe ser menor o igual a la capacidad del arco asociado (segmento de camino).

$$\text{FLUJO}_{ni,nf}^t - \text{CAPFLU}_{ni,nf} * R_{ni,nf}^t \leq 0 \quad ; \forall t$$

La capacidad del segmento de camino ( $\text{CAPFLU}_{ni,nf}$ ) puede ser definida arbitrariamente como un número muy grande (como lo realizado en este trabajo), o puede representar la capacidad real para la cual los caminos están diseñados.

- b) Caminos en proyectos: se definieron tres tipos de caminos potenciales.

- I. Caminos de verano que solamente son utilizados en verano.
- II. Caminos de invierno que solamente son utilizados en invierno.
- III. Caminos de verano utilizados un verano y cuya carpeta es mejorada para ser utilizada en invierno.

La configuración de costos de estos tipos de caminos potenciales sigue la siguiente relación:

$$CVERINV_{ni,nf} \begin{cases} \geq CCAMVER_{ni,nf} \\ \geq CCAMINV_{ni,nf} \end{cases}$$

Tal que:

$$CVERINV_{ni,nf} \leq CCAMVER_{ni,nf} + CCAMINV_{ni,nf}$$

Bajo esta relación se establece la restricción siguiente correspondiente para la temporada de verano:

$$FLUJO^1_{ni,nf} - CAPFLU_{ni,nf} * b^1_{ni,nf} - CAPFLU_{ni,nf} * b^3_{ni,nf} \leq 0$$

En esta temporada sólo existen dos opciones en la construcción del camino: se construye para ser utilizado en verano ( $b^1_{ni,nf} = 1$  y  $b^3_{ni,nf} = 0$ ) o se construye para ser utilizado en ambas temporadas ( $b^3_{ni,nf} = 1$  y  $b^1_{ni,nf} = 0$ ).

Para la temporada de invierno se tiene la siguiente restricción:

$$FLUJO^2_{ni,nf} - CAPFLU_{ni,nf} * b^2_{ni,nf} - CAPFLU_{ni,nf} * b^3_{ni,nf} \leq 0$$

Al igual que en la restricción anterior, en esta temporada de invierno sólo existen 2 opciones en la construcción del camino: se construye para ser utilizado únicamente en invierno ( $b^2_{ni,nf} = 1$  y  $b^3_{ni,nf} = 0$ ) o se construye como camino de verano y se invierte en su mejora de estándar para ser utilizado también en invierno ( $b^3_{ni,nf} = 1$  y  $b^2_{ni,nf} = 0$ ).



5.5.9.- El volumen que llega a un nodo destino (cancha de acopio, trozado, planta industrial) debe ser igual a la suma de los volúmenes por rodal tributados hacia ese nodo ficticio.

a) Cancha de acopio.

$$\sum_{i=1}^{27} \text{VOLCA}_i - \text{FLUJO}_{ni,nf}^1 = 0$$

donde nf corresponde al nodo que caracteriza a la cancha de acopio.

b) Cancha de trozado.

$$\sum_{i=1}^{27} \text{VOLTR}_i^t - \text{FLUJO}_{ni,nf}^t = 0 \quad ; \quad \forall t$$

donde nf corresponde al nodo que caracteriza a la cancha de trozado.

c) Planta industrial (verano).

$$\sum_{i=1}^{27} \text{VOLDF}_i^1 + \text{TROZDF}^1 - \text{FLUJO}_{ni,nf}^1 = 0$$

donde nf corresponde al nodo que caracteriza a la planta industrial.

d) Planta industrial (invierno).

$$\sum_{i=1}^{27} \text{VOLDF}_i^2 + \text{ACOPDF} + \text{TRODF}^2 - \text{FLUJO}_{ni,nf}^2 = 0$$

donde nf corresponde al nodo que caracteriza a la planta industrial.

5.6.- Función objetivo.

La función objetivo queda estructurada de la siguiente manera:

**MINIMIZAR**

$Z = \text{Costo de Cosecha} + \text{Costo de Transporte} + \text{Costo de Caminos} + \text{Costo generado en cancha} + \text{Costo de penalización por la selección de rodales en invierno} + \text{Costo de Oportunidad del Capital.}$

donde:

5.6.1.- Costo de cosecha:

$$\sum_{i=1}^{27} \text{CCOS}_i * \text{VOLTOT}_i * I_i + \sum_{i=1}^{27} \text{CCOS}_i * \text{VOLTOT}_i * (1 - I_i)$$

### 5.6.2.- Costo de transporte:

a) Rodal-destino final.

$$\sum_{t=1}^2 \sum_{i=1}^{27} \text{TDFINAL}_i^t * \text{VOLDF}_i^t$$

b) Rodal-cancha de acopio.

$$\sum_{i=1}^{27} \text{TACOP}_i * \text{VOLCA}_i$$

c) Rodal-cancha de trozado.

$$\sum_{t=1}^2 \sum_{i=1}^{27} \text{TTROZ}_i^t * \text{VOLTRO}_i^t$$

d) Cancha de trozado-cancha de acopio.

$$\text{TTROZAC} * \text{TRACOP}$$

e) Cancha de trozado-destino final.

$$\sum_{t=1}^2 \text{TROZDF}^t * \text{TRODF}^t$$

f) Cancha de acopio-destino final.

$$\text{TACOPDF} * \text{ACOPDF}$$

g) Costo de transporte asociado a los nodos ficticios (ni-nf).

$$\sum_{t=1}^2 \sum_{ni,nf} \text{TNODO}_{ni,nf}^t * \text{FLUJO}_{ni,nf}^t$$

5.6.3.- Costo de caminos:

a) Caminos existentes.

$$\sum_{ni,nf} (\text{CMANT}_{ni,nf}^1 * R_{ni,nf}^1 + \text{CMANT}_{ni,nf}^2 * R_{ni,nf}^2)$$

b) Caminos en proyecto.

$$\sum_{ni,nf} (\text{CCAMVER}_{ni,nf} * b_{ni,nf}^1 + \text{CCAMINV}_{ni,nf} * b_{ni,nf}^2 + \text{CVERINV}_{ni,nf} * b_{ni,nf}^3)$$

5.6.4.- Costo generado en cancha.

a) Cancha de acopio.

$$\text{CACOP} * \text{ACOPDF}$$

b) Cancha de trozado.

$$\sum_{t=1}^2 CTROZ^t * (TROZDF^t + TRACOP)$$

5.6.5.- Costo de penalización por selección de rodales en invierno. Existe una penalización inversamente proporcional al volumen para controlar que no aumente el costo de cosecha en invierno

$$CPEN * I_i$$

5.6.6.- Costo de oportunidad del capital: al interior de la cancha de acopio se asume que se emplea el sistema FIFO de inventario; es decir, el primer metro cúbico de madera ( $m^3$ ) que entra a la cancha de acopio en la temporada de verano es el primer metro cúbico ( $m^3$ ) que sale durante el invierno, por lo que en términos reales la madera sólo permanece acopiada por seis meses.

$$\sum_{i=1}^{27} (VOLCA_i * (CCOS_i + TACOP_i + CACOP)) * TD^6$$

## VI.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1.- Análisis de la restricción de demanda mínima de invierno.

El modelo es muy sensible a los cambios en los niveles de demanda mínima de invierno, variando sus tiempos computacionales de solución entre 13:45 y 55:15 minutos. Dada esta situación resulta necesario minimizar el número de nodos utilizados al definir la red del problema y en lo posible utilizar algún grado de agregación de la información; es decir, definir criterios bajo los cuales variables con iguales características pueden conformar una sola variable en términos prácticos, de esta manera se reduce el número de variables continuas, enteras y de restricciones haciendo más práctica la utilización del modelo en problemas de mayor magnitud.

### 6.2.- Análisis de la restricción sobre construcción de caminos.

A nivel de la construcción de caminos es importante destacar que, dada la configuración de costos descrita en la sección 5.5.8, la restricción siguiente, que impide que todas las variables asuman valores 1, no es necesaria dentro de la formulación del problema.

$$b_{ni,nf}^1 + b_{ni,nf}^2 + b_{ni,nf}^3 \leq 1$$

Lo anterior se debe a que por condición de optimalidad (mínimo costo), sólo una de las variables enteras puede asumir el valor 1 para ser considerada como solución óptima. Una combinación de ellas (más de una variable asumiendo el valor 1) implica solución factible, pero no óptima; ya que existe otra combinación con sólo una variable igual a 1 que posee menor costo. De esta manera, no es necesario incorporar la restricción anterior disminuyendo así el número de restricciones.

La Tabla N°1 siguiente resume las soluciones óptimas de acuerdo a los valores que pueden tomar los flujos correspondientes a un arco o segmento de camino en proyecto.

Valores Posibles			Solución óptima		
FLUJO <sup>1</sup> <sub>ni,nf</sub>	FLUJO <sup>2</sup> <sub>ni,nf</sub>		b <sup>1</sup> <sub>ni,nf</sub>	b <sup>2</sup> <sub>ni,nf</sub>	b <sup>3</sup> <sub>ni,nf</sub>
0	0	⇒	0	0	0
> 0	0	⇒	1	0	0
0	> 0	⇒	0	1	0
> 0	> 0	⇒	0	0	1

Tabla N°1. Solución óptima para las variables enteras de construcción de caminos según los niveles asumidos por las variables FLUJO<sup>1</sup><sub>ni,nf</sub> y FLUJO<sup>2</sup><sub>ni,nf</sub>.

### 6.3.- Análisis sobre la capacidad de flujo en los arcos de caminos.

El flujo de madera que pasa a través de los arcos de caminos puede seguir dos criterios.

El primer criterio, utilizado por Weintraub (1976), consiste en definirlo como un número suficientemente grande como para que no sea limitante del flujo que realmente pasará sobre un arco cualquiera. Con esto, la información entregada por el modelo puede ser utilizada para construir los caminos según los flujos reales que pasarán por ellos.

El segundo criterio consiste en definir previamente la capacidad de los caminos y obligar al modelo a que asigne rutas y flujos en función de estas capacidades.

La utilización de cualquier criterio va a estar definida por el modelador o planificador y el marco de situaciones reales en donde está inserta la modelación.

#### 6.4.- Solución computacional.

El problema base se resolvió utilizando un computador con co-procesador matemático 80486 de 100 MHz. El tamaño de este problema es de 217 restricciones y 308 variables, 95 de las cuales son enteras-binarias (ver Apéndice N°1).

En cuanto a los tiempos computacionales invertidos en la solución del problema, al considerar una demanda mínima de invierno de 35.000 m<sup>3</sup> el tiempo requerido para resolver éste fue de 45:38 minutos.

El tiempo de procesamiento está condicionado por la naturaleza combinatoria del problema, donde el algoritmo de solución (branch and bound) puede tener 2<sup>n</sup> nodos a explorar (con n igual al número de variables enteras). En este problema, el número de variables enteras está determinada por la cantidad de rodales existentes y, más aún, por la cantidad de nodos que se definan.

Bajo esta situación, el desarrollo de una heurística aplicable a este tipo de problemas podría ser una herramienta complementaria poderosa que reduciría los tiempos computacionales de solución y que permitiría la modelación de problemas de mayor magnitud.

#### 6.5.- Verificación de los resultados.

Los resultados correspondientes al problema base (ver Apéndice N°2), utilizando una demanda mínima de 35.000 m<sup>3</sup> en invierno, muestran un valor de la función objetivo de US\$ 15.111.080 para cosechar 103.180 m<sup>3</sup>. Sin embargo, al extraer los costos de penalización junto al factor de expansión (100) en los costos de transporte del flujo de madera al interior del predio, el real valor de la función objetivo para este problema es de US\$ 1.556.312.

La capacidad de la cancha de trozado se ocupa en su totalidad durante la temporada de verano (30.000 m<sup>3</sup>); sin embargo, en la temporada de invierno sólo



se ocupa en 17.056 m<sup>3</sup>. El ahorro de aproximadamente US\$1.5 por metro cúbico en los costos de producción (cosecha) de trozo largo versus trozo corto es determinante para que el modelo prefiera producir trozos largos y enviarlos a cancha de trozado.

En cuanto a la capacidad de la cancha de acopio, dado los altos costo que se generan (carguío, descarguío, costos fijos y oportunidad del capital) no resulta conveniente enviar madera a esta cancha.

El modelo, racionalmente, tiende a cosechar en invierno los rodales que están más cerca de los destinos, para minimizar así los costos de construcción y estabilizado de caminos.

La Tabla N°2 muestra como varía la selección de rodales según los distintos niveles de demandas mínimas de invierno.

<b>Demanda mínima de invierno (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Rodales seleccionados cosecha de invierno</b>
10.000	12-21
20.000	12-15-17-20-21-23
35.000	4-5-7-12-15-19-20-21-27

Demanda mínima de invierno utilizada en el problema base.

Tabla N°2. Selección de rodales según niveles de demanda mínima durante la temporada de invierno.

Con una demanda mínima de 10.000 m<sup>3</sup> (ver Apéndice N°4) sólo se seleccionaron los rodales 12 y 21 (10.842 m<sup>3</sup> totales), coloreados en amarillo, dado que la estabilización de la ruta que forman los nodos n° 10, 12, 13, 14, 30 y 9, coloreada en azul, tiene un menor costo que cualquier otra ruta alternativa; como por ejemplo, la que forman los nodos n° 10, 12, 17, 18, 19, 20, 30 y 9. Así también, cualquier opción que involucre la cosecha del rodal 14 tendría que asumir el alto costo de construir el camino que habilita a dicho rodal en invierno.

Al subir la demanda mínima a 20.000 m<sup>3</sup> (ver Apéndice N°5), los rodales seleccionados para la cosecha de invierno, coloreados en amarillo, son el 12, 15, 17, 20, 21 y 23.

El modelo tiende a minimizar las rutas utilizadas en invierno; trata de obtener la mayor utilización de la ruta seleccionada dado los altos costos de camino en invierno.

En este sentido, con una demanda mínima de 20.000 m<sup>3</sup> se conforman dos rutas coloreadas en azul. La primera está compuesta por los nodos n° 10, 12, 13, 14, 30 y 9; y la segunda está compuesta por los nodos n° 18, 19, 20, 30 y 9. En esta última ruta, el rodal 18 no es seleccionado, ya que, por una parte, resulta más económico cosecharlo durante la temporada de verano debido a que esa ruta también será utilizada en verano; y por otra, el rodal 18 (en ausencia del rodal 21) no satisface la restricción de demanda mínima mayor o igual a 20.000 m<sup>3</sup> (19.585 m<sup>3</sup>). En el caso de satisfacer la restricción sería más rentable cosechar en invierno el rodal 18 y cosechar en verano el rodal 21 conformando en consecuencia una sola ruta a través de los nodos n° 12, 17, 18, 19, 20, 30 y 9.

Cualquier selección de un arco de camino que pertenezca a otra ruta aumentaría el costo de caminos. Por otro lado, cualquier opción que involucre la construcción de un camino en invierno posee un costo muy alto.

Con la demanda mínima de 35.000 m<sup>3</sup> del problema base (ver Apéndice N°6) la selección de los rodales 4, 5, 7, 12, 15, 19, 20, 21 y 27, coloreados en amarillo, sigue el mismo criterio de minimizar el número de rutas de invierno. La ruta seleccionada ahora, coloreada en azul, está compuesta de los nodos n° 3, 4, 5, 10, 12, 13, 14, 30 y 9. Se desecharon los rodales 17 y 23 elegidos anteriormente, porque implicaban considerar otra ruta que aumentaría el costo de caminos.

Por otro lado, toda construcción de caminos se realizó para la temporada de verano, debido principalmente a su bajo costo y a que todos los caminos potenciales o en proyecto servían para acceder solamente a un rodal. En términos reales se estaba decidiendo sobre la construcción de un camino de verano o uno de invierno; donde evidentemente resulta más económica la opción de verano. Si el camino sirviera para acceder a más rodales, las tres opciones de construcción (verano, invierno y verano-invierno) estarían siendo evaluadas dando origen a caminos que se construyen para ser utilizados en ambas temporadas.

Debido a que el problema considera costos de transporte y cosecha iguales en ambas temporadas, facilita la existencia de soluciones múltiples debido a la

poca resolución que se genera. En este sentido, es recomendable desarrollar una base de datos con costos desagregados y estimados eficientemente a nivel de rodal, de manera tal que éstos se puedan constituir en criterios de selección al momento de obtener soluciones. Actualmente, el modelo utiliza la variable entera  $I_i$  asociada a un costo de penalización que refleja sólo una estimación de aquella diferencia en costos.

### 6.6.- Modelo General.

La incorporación de la madera de terceros como opción de abastecimiento da la posibilidad de que ciertos rodales no se cosechen por tener un costo total (US\$/m<sup>3</sup>) más alto que la alternativa de abastecimiento externo.

Debido a lo anterior, es necesario asignar una variable entera distinta a cada rodal según temporada (ver Anexo N°3). De esta manera se incorpora la siguiente restricción que impide que un rodal cosechado quede disponible en la temporada siguiente.

$$I_1 + I_2 \leq 1$$

Donde:

$$I_i^1 \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{si el rodal } i \text{ se cosecha en verano.} \\ 0 & \text{si no se cosecha} \end{array} \right.$$

$$I_i^2 \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{si el rodal } i \text{ se cosecha en invierno.} \\ 0 & \text{si no se cosecha} \end{array} \right.$$

Si ambas variables son cero entonces el rodal no se cosecha y el volumen equivalente se obtiene por compra a terceros.

#### 6.7.- Implementación computacional.

Por último, debido a la complejidad del problema definida por el número de variables y restricciones a los que se pueden llegar, la formulación del modelo debiera estar apoyada por un sistema capaz de generar un ambiente interactivo entre el usuario modelador, coberturas y bases de datos del Sistema de Información Geográfico a fin de que el usuario gráficamente pueda definir la red del problema a resolver; es decir, definir nodos y sus posiciones, definir rodales, canchas, criterios de agregación de la información y definir un set de rutas factibles para evacuar la madera.

## VII.- CONCLUSIONES

- 1.- El modelo diseñado constituye una herramienta analítica para tomar decisiones durante la planeación forestal al considerar en conjunto las actividades de cosecha, transporte y caminos.
- 2.- Dado que se ha resuelto un problema real de planificación forestal con el mínimo de supuestos, se concluye que el modelo desarrollado es perfectamente aplicable a otras situaciones como la expuesta en esta tesis. Sin embargo, cambios en los supuestos y evaluación de otras alternativas no cubiertas aquí requerirán una modificación del modelo.
- 3.- La mayor utilidad percibida en el desarrollo del modelo es la capacidad de poder modelar en conjunto las tres operaciones relevantes en el proceso de producción: cosecha, transporte y caminos. Cualquier toma de decisión bajo un escenario que no considere algunas de estas actividades será subóptima con respecto al escenario que integre estas operaciones de producción.
- 4.- Un importante papel cumple la implementación computacional del modelo a fin de minimizar los errores de digitación, ahorrar tiempo valioso en la formulación del problema y proporcionar versatilidad en la modelación.
- 5.- En general, los modelos no siempre cubren todas las situaciones relevantes de un problema y este modelo no es una excepción. Lo realmente importante es que el modelo no pierda el sentido de la realidad del problema cualquiera sea el nivel de agregación de la información y los supuestos asumidos.
- 6.- Por último, debido a que los modelos de ninguna manera reemplazan el criterio del profesional, el modelo desarrollado sólo constituye una herramienta de ayuda en la toma de decisiones. Varias pruebas debieran realizarse para cada situación en particular (análisis paramétrico), a fin de construir un set de posibles soluciones bajo distintos escenarios, evaluarlos y seleccionar la mejor alternativa para el escenario más probable.

## VIII.- BIBLIOGRAFÍA

CPLEX Optimization, Inc. 1994. Solving Mixed Integer Problems. Cap. 4:63-78. *In* Using the CPLEX Linear Optimizer. 130 p.

Dykstra, D. P. 1984. Integer Programming. Cap 9:260-285. *In* Mathematical Programming for Natural Resource Management. McGraw-Hill. New York. 318 p.

Guignard, M., Choonho, R., Spielberg, K. 1993. Model Tightening for Integrated Timber Harvest and Transportation Planning. International Symposium on System Analysis and Management Decisions in Forestry Proceedings. Valdivia. Chile. pp. 364-369.

Hillier, F., Lieberman, G. J. 1982. Programación Entera. Cap. 18:713-746. *In* Introducción a la Investigación de Operaciones. 2a. ed. McGraw-Hill. México.

Laroze, A., Backhouse, P., de Toro, R. 1988. Modelo de Planificación de la Producción de Rollizos. Taller de Producción Forestal. Concepción. Chile. pp. II1-II8.

Laroze, A. 1996. Fundamentos de Programación Lineal para Profesionales del Sector Forestal. Curso de perfeccionamiento. Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Forestal. Santiago. Chile. 69 p.

Paredes, G. 1988. Estabilizado de Caminos Versus Formación de Stock. Taller de Producción Forestal. Concepción. Chile. pp. VIII1-VIII8.

Schrage, L. 1989. Linear, Integer and Quadratic Programming with LINDO. User's Manual. 4<sup>th</sup> ed. The Scientific Press. 95 p.

Schroeder, R. 1992. Administración de Operaciones. McGraw Hill. México. 855 p.

Weintraub, A. 1975. Modelos Matemáticos en Planificación Forestal. Revista Ingeniería de Sistemas 1(2): 39-60.

Weintraub, A., Navon, D. 1976. A Forest Management Planning Model Integrating Silvicultural and Transportation Activities. Management Sciences (22):1299-1309.

Weintraub, A., Navon, D. 1986. Mathematical Programming In Large Scale Forestry Modeling and Applications. Management Sciences (21):1337-351.

Weintraub, A., Morales, R., Serón, J., Epstein, R., Traverso, P. 1991. Managing Operations in Pine Forest Industries. Systems Analysis in Forest Resources. Charleston. EE.UU. Anales pp. 31-34.

Weintraub, A., Barahona, F., Epstein, R. 1994. A Column Generation Algorithm for Solving General Forest Planning Problems with Adjacency Constraints. Forest Science 40(1):142-161.

Winston, W. 1991. Integer Programming. Cap 9:445-528. *In* Operations Research Applications and Algorithms. 2<sup>nd</sup> ed. PWS-Kent, Boston. 1262 p.

**APÉNDICE N°1:**  
**Formulación del Modelo en Lenguaje LINDO**



**APÉNDICE N°1:**  
**Formulación del Modelo en Lenguaje LINDO**

**MIN 520 R10203 + 1263 R20203**  
**+ 208 R10304 + 505 R20304 + 520 R10405 + 1263 R20405**  
**+ 1040 R10506 + 2526 R20506 + 156 R10607 + 379 R20607**  
**+ 1716 R10708 + 4169 R20708 + 1300 R10809 + 3158 R20809**  
**+ 1820 R10510 + 4421 R20510 + 312 R11012 + 758 R21012**  
**+ 364 R11213 + 884 R21213 + 2080 R11314 + 5052 R21314**  
**+ 312 R11430 + 757 R21430 + 312 R12914 + 758 R22914**  
**+ 1560 R11217 + 3789 R21217 + 1560 R11718 + 3790 R21718**  
**+ 260 R11819 + 632 R21819 + 1040 R11920 + 2526 R21920**  
**+ 1040 R12030 + 2526 R22030 + 520 R12719 + 1263 R22719**  
**+ 156 R10222 + 379 R20222 + 1976 R12225 + 4801 R22225**  
**+ 1040 R12527 + 2526 R22527**

**!COSTO CAMINOS EN PROYECTO**  
**+ 3787 B10002 + 13898 B20002 + 16305 B30002 + 3443 B11112**  
**+ 12634 B21112 + 14823 B31112 + 6886 B12808 + 25269 B22808**  
**+ 29646 B32808 + 10328 B11617 + 37903 B21617 + 44468 B31617**  
**+ 10328 B10526 + 37903 B20526 + 44468 B30526 + 4131 B12627**  
**+ 15161 B22627 + 17787 B32627 + 4131 B12322 + 15161 B22322**  
**+ 17787 B32322 + 3948 B12122 + 14352 B22122 + 17548 B32122**

**!CTO. TRANSPORTE PUERTA DEL PREDIO-DESTINO FINAL + CTO.**

**!COSECHA TROZO CORTO**  
**+ 13.2 VOLDF101 + 13.2 VOLDF201 + 12.7 VOLDF102 + 12.7 VOLDF202**  
**+ 12.7 VOLDF103 + 12.7 VOLDF203 + 13.2 VOLDF104 + 13.2 VOLDF204**  
**+ 13.2 VOLDF105 + 13.2 VOLDF205 + 12.3 VOLDF106 + 12.3 VOLDF206**  
**+ 13.3 VOLDF107 + 13.3 VOLDF207 + 14.4 VOLDF108 + 14.4 VOLDF208**  
**+ 13.9 VOLDF109 + 13.9 VOLDF209 + 13.1 VOLDF110 + 13.1 VOLDF210**  
**+ 13.6 VOLDF111 + 13.6 VOLDF211 + 12.9 VOLDF112 + 12.9 VOLDF212**  
**+ 14.0 VOLDF113 + 14.0 VOLDF213 + 12.9 VOLDF114 + 12.9 VOLDF214**  
**+ 13.5 VOLDF115 + 13.5 VOLDF215 + 13.1 VOLDF116 + 13.1 VOLDF216**  
**+ 13.0 VOLDF117 + 13.0 VOLDF217 + 13.5 VOLDF118 + 13.5 VOLDF218**  
**+ 12.7 VOLDF119 + 12.7 VOLDF219 + 13.2 VOLDF120 + 13.2 VOLDF220**  
**+ 13.3 VOLDF121 + 13.3 VOLDF221 + 12.9 VOLDF122 + 12.9 VOLDF222**  
**+ 13.9 VOLDF123 + 13.9 VOLDF223 + 12.5 VOLDF124 + 12.5 VOLDF224**  
**+ 12.9 VOLDF125 + 12.9 VOLDF225 + 12.7 VOLDF126 + 12.7 VOLDF226**  
**+ 12.8 VOLDF127 + 12.8 VOLDF227**

**!CTO. TRANSPORTE PUERTA DEL PREDIO-CANCHA ACOPIO + CTO.**

**!COSECHA TROZO CORTO**  
**+ 12.4 VOLCA01 + 12.2 VOLCA02 + 11.9 VOLCA03 + 12.4 VOLCA04**  
**+ 12.4 VOLCA05 + 11.5 VOLCA06 + 12.5 VOLCA07 + 13.6 VOLCA08**  
**+ 13.1 VOLCA09 + 12.3 VOLCA10 + 12.8 VOLCA11 + 12.1 VOLCA12**  
**+ 13.2 VOLCA13 + 12.1 VOLCA14 + 12.7 VOLCA15 + 12.3 VOLCA16**  
**+ 12.2 VOLCA17 + 12.7 VOLCA18 + 11.9 VOLCA19 + 12.4 VOLCA20**  
**+ 12.5 VOLCA21 + 12.1 VOLCA22 + 13.1 VOLCA23 + 11.7 VOLCA24**  
**+ 12.1 VOLCA25 + 11.9 VOLCA26 + 12.0 VOLCA27**

**!CTO.COSECHA PRODUCTO LARGO**

+ 5.6 VOLTR101 + 5.6 VOLTR201 + 5.4 VOLTR102 + 5.4 VOLTR202  
+ 5.2 VOLTR103 + 5.2 VOLTR203 + 5.6 VOLTR104 + 5.6 VOLTR204  
+ 5.6 VOLTR105 + 5.6 VOLTR205 + 4.9 VOLTR106 + 4.9 VOLTR206  
+ 5.7 VOLTR107 + 5.7 VOLTR207 + 6.6 VOLTR108 + 6.6 VOLTR208  
+ 6.2 VOLTR109 + 6.2 VOLTR209 + 5.5 VOLTR110 + 5.5 VOLTR210  
+ 5.9 VOLTR111 + 5.9 VOLTR211 + 5.4 VOLTR112 + 5.4 VOLTR212  
+ 6.2 VOLTR113 + 6.2 VOLTR213 + 5.4 VOLTR114 + 5.4 VOLTR214  
+ 5.8 VOLTR115 + 5.8 VOLTR215 + 5.5 VOLTR116 + 5.5 VOLTR216  
+ 5.5 VOLTR117 + 5.5 VOLTR217 + 5.8 VOLTR118 + 5.8 VOLTR218  
+ 5.2 VOLTR119 + 5.2 VOLTR219 + 5.6 VOLTR120 + 5.6 VOLTR220  
+ 5.7 VOLTR121 + 5.7 VOLTR221 + 5.4 VOLTR122 + 5.4 VOLTR222  
+ 6.2 VOLTR123 + 6.2 VOLTR223 + 5.1 VOLTR124 + 5.1 VOLTR224  
+ 5.4 VOLTR125 + 5.4 VOLTR225 + 5.2 VOLTR126 + 5.2 VOLTR226  
+ 5.3 VOLTR127 + 5.3 VOLTR227

**!CTO.TRANSPORTE CACOPIO-DFINAL**

+ 1.40 ACOPDF

**!CTO.TRANSPORTE (US\$5.3) CTROZADO-CACOPIO**

+ 5.30 TRACOP

**!CTO.TRANSPORTE (US\$6.1) CTROZADO-DFINAL**

+ 6.10 TRODF1 + 6.10 TRODF2

**!PENALIZACION POR SELECCION EN INVIERNO (10% DEL CTO TRANS.+COSECHA)**

+ 896 I01 + 9540 I02 + 10016 I03 + 6517 I04 + 8099 I05  
+ 3571 I06 + 796 I07 + 4773 I08 + 5026 I09 + 1138 I10  
+ 10181 I11 + 7782 I12 + 4017 I13 + 4513 I14 + 3402 I15  
+ 1571 I16 + 1415 I17 + 2511 I18 + 1882 I19 + 1506 I20  
+ 2988 I21 + 3620 I22 + 3553 I23 + 4074 I24 + 3077 I25  
+ 1882 I26 + 2438 I27

**!COSTO EN CANCHA DE TROZADO (DESCARG.-!CARG.,TROZADO,MANTENCION)**

+ 1.28 TRODF1 + 1.28 TRODF2 + 1.28 TRACOP

**!COSTO EN CANCHA ACOPIO (DESCARG-CARG,CTO.OPORTUNIDAD)**

+ 4.29 ACOPDF

**!COSTO TRANSPORTE (US\$/M3) DENTRO DE LA RED DE CAMINOS DEL !PREDIO**

+ 3.1 FN10002 + 6.2 FN12122 + 6.2 FN10203 + 3 FN10304  
+ 3 FN10405 + 3 FN10506 + 9 FN10607 + 9 FN10708  
+ 36 FN10809 + 4 FN10510 + 4 FN11012 + 2 FN11112  
+ 3 FN11213 + 3 FN11314 + 5 FN11430 + 7 FN12914  
+ 7 FN12808 + 4.2 FN11217 + 4 FN11617 + 3 FN11718  
+ 3 FN11819 + 3 FN11920 + 15 FN12030 + 12 FN10526  
+ 12 FN12627 + 3 FN12719 + 13 FN10222  
+ 4 FN12322 + 7.2 FN12225 + 12 FN12527 + 49 FN13009 + 63 FN10931  
+ 3.1 FN20002 + 6.2 FN22122 + 6.2 FN20203 + 3 FN20304  
+ 3 FN20405 + 3 FN20506 + 9 FN20607 + 9 FN20708 + 36 FN20809  
+ 4 FN20510 + 4 FN21012 + 2 FN21112 + 3 FN21213 + 3 FN21314

+ 5 FN21430 + 7 FN22914 + 7 FN22808 + 4.2 FN21217 + 4 FN21617  
 + 3 FN21718 + 3 FN21819 + 3 FN21920 + 15 FN22030  
 + 12 FN20526 + 12 FN22627 + 3 FN22719 + 13 FN20222  
 + 4 FN22322 + 7.2 FN22225 + 12 FN22527 + 49 FN23009 + 63 FN20931

SUBJECT TO

!RESTRICCION NUMERO 1

c1) VOLDF101 + VOLDF102 + VOLDF103 + VOLDF104 + VOLDF105  
 + VOLDF106 + VOLDF107 + VOLDF108 + VOLDF109 + VOLDF110  
 + VOLDF111 + VOLDF112 + VOLDF113 + VOLDF114 + VOLDF115  
 + VOLDF116 + VOLDF117 + VOLDF118 + VOLDF119 + VOLDF120  
 + VOLDF121 + VOLDF122 + VOLDF123 + VOLDF124 + VOLDF125  
 + VOLDF126 + VOLDF127 + VOLCA01 + VOLCA02 + VOLCA03  
 + VOLCA04 + VOLCA05 + VOLCA06 + VOLCA07 + VOLCA08  
 + VOLCA09 + VOLCA10 + VOLCA11 + VOLCA12 + VOLCA13  
 + VOLCA14 + VOLCA15 + VOLCA16 + VOLCA17 + VOLCA18  
 + VOLCA19 + VOLCA20 + VOLCA21 + VOLCA22 + VOLCA23  
 + VOLCA24 + VOLCA25 + VOLCA26 + VOLCA27 + VOLTR101  
 + VOLTR102 + VOLTR103 + VOLTR104 + VOLTR105 + VOLTR106  
 + VOLTR107 + VOLTR108 + VOLTR109 + VOLTR110 + VOLTR111  
 + VOLTR112 + VOLTR113 + VOLTR114 + VOLTR115 + VOLTR116  
 + VOLTR117 + VOLTR118 + VOLTR119 + VOLTR120 + VOLTR121  
 + VOLTR122 + VOLTR123 + VOLTR124 + VOLTR125 + VOLTR126  
 + VOLTR127 >= 0

c2) VOLDF201 + VOLDF202 + VOLDF203 + VOLDF204 + VOLDF205  
 + VOLDF206 + VOLDF207 + VOLDF208 + VOLDF209 + VOLDF210  
 + VOLDF211 + VOLDF212 + VOLDF213 + VOLDF214 + VOLDF215  
 + VOLDF216 + VOLDF217 + VOLDF218 + VOLDF219 + VOLDF220  
 + VOLDF221 + VOLDF222 + VOLDF223 + VOLDF224 + VOLDF225  
 + VOLDF226 + VOLDF227 + VOLTR201 + VOLTR202 + VOLTR203  
 + VOLTR204 + VOLTR205 + VOLTR206 + VOLTR207 + VOLTR208  
 + VOLTR209 + VOLTR210 + VOLTR211 + VOLTR212 + VOLTR213  
 + VOLTR214 + VOLTR215 + VOLTR216 + VOLTR217 + VOLTR218  
 + VOLTR219 + VOLTR220 + VOLTR221 + VOLTR222 + VOLTR223  
 + VOLTR224 + VOLTR225 + VOLTR226 + VOLTR227 >= 35000

!RESTRICCION NUMERO 2

c3) - 879 I01 + VOLDF201 + VOLTR201 = 0  
 c4) 879 I01 + VOLDF101 + VOLCA01 + VOLTR101 = 879  
 c5) VOLTR101 + VOLTR201 <= 440  
 D3) - 4235 I02 + VOLDF202 + VOLTR202 = 0  
 D4) 4235 I02 + VOLDF102 + VOLCA01 + VOLTR102 = 4235  
 D5) VOLTR102 + VOLTR202 <= 2217  
 c7) - 10656 I03 + VOLDF203 + VOLTR203 = 0  
 c8) 10656 I03 + VOLDF103 + VOLCA03 + VOLTR103 = 10656  
 c9) VOLTR103 + VOLTR203 <= 5328  
 c10) - 6390 I04 + VOLDF204 + VOLTR204 = 0  
 c11) 6390 I04 + VOLDF104 + VOLCA04 + VOLTR104 = 6390  
 c12) VOLTR104 + VOLTR204 <= 3195

- c13) - 7941 I05 + VOLDF205 + VOLTR205 = 0  
c14) 7941 I05 + VOLDF105 + VOLCA05 + VOLTR105 = 7941  
c15) VOLTR105 + VOLTR205 <= 3970  
c16) - 4013 I06 + VOLDF206 + VOLTR206 = 0  
c17) 4013 I06 + VOLDF106 + VOLCA06 + VOLTR106 = 4013  
c18) VOLTR106 + VOLTR206 <= 2006  
c19) - 773 I07 + VOLDF207 + VOLTR207 = 0  
c20) 773 I07 + VOLDF107 + VOLCA07 + VOLTR107 = 773  
c21) VOLTR107 + VOLTR207 <= 386  
c22) - 4011 I08 + VOLDF208 + VOLTR208 = 0  
c23) 4011 I08 + VOLDF108 + VOLCA08 + VOLTR108 = 4011  
c24) VOLTR108 + VOLTR208 <= 2005  
c25) - 4488 I09 + VOLDF209 + VOLTR209 = 0  
c26) 4488 I09 + VOLDF109 + VOLCA09 + VOLTR109 = 4488  
c27) VOLTR109 + VOLTR209 <= 2244  
c28) - 1138 I10 + VOLDF210 + VOLTR210 = 0  
c29) 1138 I10 + VOLDF110 + VOLCA10 + VOLTR110 = 1138  
c30) VOLTR110 + VOLTR210 <= 569  
c31) - 9515 I11 + VOLDF211 + VOLTR211 = 0  
c32) 9515 I11 + VOLDF111 + VOLCA11 + VOLTR111 = 9515  
c33) VOLTR111 + VOLTR211 <= 4757  
c34) - 7941 I12 + VOLDF212 + VOLTR212 = 0  
c35) 7941 I12 + VOLDF112 + VOLCA12 + VOLTR112 = 7941  
c36) VOLTR112 + VOLTR212 <= 3970  
c37) - 3555 I13 + VOLDF213 + VOLTR213 = 0  
c38) 3555 I13 + VOLDF113 + VOLCA13 + VOLTR113 = 3555  
c39) VOLTR113 + VOLTR213 <= 1777  
c40) - 4606 I14 + VOLDF214 + VOLTR214 = 0  
c41) 4606 I14 + VOLDF114 + VOLCA14 + VOLTR114 = 4606  
c42) VOLTR114 + VOLTR214 <= 2300  
c43) - 3210 I15 + VOLDF215 + VOLTR215 = 0  
c44) 3210 I15 + VOLDF115 + VOLCA15 + VOLTR115 = 3210  
c45) VOLTR115 + VOLTR215 <= 1605  
c46) - 1571 I16 + VOLDF216 + VOLTR216 = 0  
c47) 1571 I16 + VOLDF116 + VOLCA16 + VOLTR116 = 1571  
c48) VOLTR116 + VOLTR216 <= 785  
c49) - 1415 I17 + VOLDF217 + VOLTR217 = 0  
c50) 1415 I17 + VOLDF117 + VOLCA17 + VOLTR117 = 1415  
c51) VOLTR117 + VOLTR217 <= 707  
c52) - 2369 I18 + VOLDF218 + VOLTR218 = 0  
c53) 2369 I18 + VOLDF118 + VOLCA18 + VOLTR118 = 2369  
c54) VOLTR118 + VOLTR218 <= 1184  
c55) - 2003 I19 + VOLDF219 + VOLTR219 = 0  
c56) 2003 I19 + VOLDF119 + VOLCA19 + VOLTR119 = 2003  
c57) VOLTR119 + VOLTR219 <= 1000  
c58) - 1477 I20 + VOLDF220 + VOLTR220 = 0  
c59) 1477 I20 + VOLDF120 + VOLCA20 + VOLTR120 = 1477

- c60)  $VOLTR120 + VOLTR220 \leq 738$   
 c61)  $-2901 I21 + VOLDF221 + VOLTR221 = 0$   
 c62)  $2901 I21 + VOLDF121 + VOLCA21 + VOLTR121 = 2901$   
 c63)  $VOLTR121 + VOLTR221 \leq 1450$   
 c64)  $-3694 I22 + VOLDF222 + VOLTR222 = 0$   
 c65)  $3694 I22 + VOLDF122 + VOLCA22 + VOLTR122 = 3694$   
 c66)  $VOLTR122 + VOLTR222 \leq 1847$   
 c67)  $-3173 I23 + VOLDF223 + VOLTR223 = 0$   
 c68)  $3173 I23 + VOLDF123 + VOLCA23 + VOLTR123 = 3173$   
 c69)  $VOLTR123 + VOLTR223 \leq 1586$   
 c70)  $-3543 I24 + VOLDF224 + VOLTR224 = 0$   
 c71)  $3543 I24 + VOLDF124 + VOLCA24 + VOLTR124 = 3543$   
 c72)  $VOLTR124 + VOLTR224 \leq 1771$   
 c73)  $-3140 I25 + VOLDF225 + VOLTR225 = 0$   
 c74)  $3140 I25 + VOLDF125 + VOLCA25 + VOLTR125 = 3140$   
 c75)  $VOLTR125 + VOLTR225 \leq 1570$   
 c76)  $-2003 I26 + VOLDF226 + VOLTR226 = 0$   
 c77)  $2003 I26 + VOLDF126 + VOLCA26 + VOLTR126 = 2003$   
 c78)  $VOLTR126 + VOLTR226 \leq 1000$   
 c79)  $-2540 I27 + VOLDF227 + VOLTR227 = 0$   
 c80)  $2540 I27 + VOLDF127 + VOLCA27 + VOLTR127 = 2540$   
 c81)  $VOLTR127 + VOLTR227 \leq 1270$

**!RESTRICCION NUMERO 3**

- c82)  $TRACOP + VOLCA01 + VOLCA02 + VOLCA03$   
 $+ VOLCA04 + VOLCA05 + VOLCA06 + VOLCA07 + VOLCA08$   
 $+ VOLCA09 + VOLCA10 + VOLCA11 + VOLCA12 + VOLCA13$   
 $+ VOLCA14 + VOLCA15 + VOLCA16 + VOLCA17 + VOLCA18$   
 $+ VOLCA19 + VOLCA20 + VOLCA21 + VOLCA22 + VOLCA23$   
 $+ VOLCA24 + VOLCA25 + VOLCA26 + VOLCA27 \leq 20000$

**!RESTRICCION NUMERO 4**

- c83)  $VOLTR101 + VOLTR102 + VOLTR103 + VOLTR104 + VOLTR105$   
 $+ VOLTR106 + VOLTR107 + VOLTR108 + VOLTR109 + VOLTR110 +$   
 $VOLTR111$   
 $+ VOLTR112 + VOLTR113 + VOLTR114 + VOLTR115 + VOLTR116 +$   
 $VOLTR117$   
 $+ VOLTR118 + VOLTR119 + VOLTR120 + VOLTR121 + VOLTR122 +$   
 $VOLTR123$   
 $+ VOLTR124 + VOLTR125 + VOLTR126 + VOLTR127 \leq 30000$

**!RESTRICCION NUMERO 5**

- c84)  $VOLTR201 + VOLTR202 + VOLTR203 + VOLTR204 + VOLTR205$   
 $+ VOLTR206 + VOLTR207 + VOLTR208 + VOLTR209 + VOLTR210$   
 $+ VOLTR211 + VOLTR212 + VOLTR213 + VOLTR214 + VOLTR215$   
 $+ VOLTR216 + VOLTR217 + VOLTR218 + VOLTR219 + VOLTR220$   
 $+ VOLTR221 + VOLTR222 + VOLTR223 + VOLTR224 + VOLTR225$   
 $+ VOLTR226 + VOLTR227 \leq 30000$   
 c85)  $-ACOPDF + TRACOP + VOLCA01 + VOLCA02 + VOLCA03 +$   
 $VOLCA04$

$$\begin{aligned}
 &+ \text{VOLCA05} + \text{VOLCA06} + \text{VOLCA07} + \text{VOLCA08} + \text{VOLCA09} + \text{VOLCA10} \\
 &+ \text{VOLCA11} + \text{VOLCA12} + \text{VOLCA13} + \text{VOLCA14} + \text{VOLCA15} + \text{VOLCA16} \\
 &+ \text{VOLCA17} + \text{VOLCA18} + \text{VOLCA19} + \text{VOLCA20} + \text{VOLCA21} + \text{VOLCA22} \\
 &+ \text{VOLCA23} + \text{VOLCA24} + \text{VOLCA25} + \text{VOLCA26} + \text{VOLCA27} = 0
 \end{aligned}$$

**!RESTRICCION NUMERO 6**

$$\begin{aligned}
 &\text{c86) - TRODF1 - TRACOP} + \text{VOLTR101} + \text{VOLTR102} + \text{VOLTR103} \\
 &\quad + \text{VOLTR104} + \text{VOLTR105} + \text{VOLTR106} + \text{VOLTR107} + \text{VOLTR108} + \\
 &\text{VOLTR109} \\
 &\quad + \text{VOLTR110} + \text{VOLTR111} + \text{VOLTR112} + \text{VOLTR113} + \text{VOLTR114} + \\
 &\text{VOLTR115} \\
 &\quad + \text{VOLTR116} + \text{VOLTR117} + \text{VOLTR118} + \text{VOLTR119} + \text{VOLTR120} + \\
 &\text{VOLTR121} \\
 &\quad + \text{VOLTR122} + \text{VOLTR123} + \text{VOLTR124} + \text{VOLTR125} + \text{VOLTR126} \\
 &\quad + \text{VOLTR127} = 0
 \end{aligned}$$

**!RESTRICCION NUMERO 7**

$$\begin{aligned}
 &\text{c87) - TRODF2} + \text{VOLTR201} + \text{VOLTR202} + \text{VOLTR203} + \text{VOLTR204} \\
 &\quad + \text{VOLTR205} + \text{VOLTR206} + \text{VOLTR207} + \text{VOLTR208} + \text{VOLTR209} + \\
 &\text{VOLTR210} \\
 &\quad + \text{VOLTR211} + \text{VOLTR212} + \text{VOLTR213} + \text{VOLTR214} + \text{VOLTR215} + \\
 &\text{VOLTR216} \\
 &\quad + \text{VOLTR217} + \text{VOLTR218} + \text{VOLTR219} + \text{VOLTR220} + \text{VOLTR221} + \\
 &\text{VOLTR222} \\
 &\quad + \text{VOLTR223} + \text{VOLTR224} + \text{VOLTR225} + \text{VOLTR226} + \text{VOLTR227} = 0
 \end{aligned}$$

**!RESTRICCION NUMERO 8 CONSERVACION DE FLUJO VERANO**

$$\begin{aligned}
 &\text{c88) VOLDF103} + \text{VOLCA03} + \text{VOLTR103} - \text{FN10002} = 0 \\
 &\text{c90) FN10002} + \text{VOLDF101} + \text{VOLCA01} + \text{VOLTR101} - \text{FN10203} \\
 &\quad - \text{FN10222} = 0 \\
 &\text{c91) VOLDF104} + \text{VOLCA04} + \text{VOLTR104} + \text{VOLDF105} + \text{VOLCA05} \\
 &\quad + \text{VOLTR105} + \text{FN10203} - \text{FN10304} = 0 \\
 &\text{c92) VOLDF107} + \text{VOLCA07} + \text{VOLTR107} + \text{FN10304} - \text{FN10405} = 0 \\
 &\text{c93) VOLDF127} + \text{VOLCA27} + \text{VOLTR127} + \text{FN10405} - \text{FN10526} \\
 &\quad - \text{FN10510} - \text{FN10506} = 0 \\
 &\text{c94) VOLDF109} + \text{VOLCA09} + \text{VOLTR109} + \text{VOLDF113} + \text{VOLCA13} \\
 &\quad + \text{VOLTR113} + \text{FN10506} - \text{FN10607} = 0 \\
 &\text{d94) VOLDF116} + \text{VOLCA16} + \text{VOLTR116} + \text{FN10607} - \text{FN10708} = 0 \\
 &\text{c95) VOLDF122} + \text{VOLCA22} + \text{VOLTR122} - \text{FN12808} = 0 \\
 &\text{c96) FN12808} + \text{FN10708} - \text{FN10809} = 0 \\
 &\text{c97) VOLDF112} + \text{VOLCA12} + \text{VOLTR112} + \text{VOLDF115} + \text{VOLCA15} \\
 &\quad + \text{VOLTR115} + \text{FN10510} - \text{FN11012} = 0 \\
 &\text{c98) VOLDF125} + \text{VOLCA25} + \text{VOLTR125} - \text{FN11112} = 0 \\
 &\text{c99) VOLDF120} + \text{VOLCA20} + \text{VOLTR120} + \text{FN11112} + \text{FN11012} \\
 &\quad - \text{FN11213} - \text{FN11217} = 0 \\
 &\text{c100) VOLDF121} + \text{VOLCA21} + \text{VOLTR121} + \text{FN11213} - \text{FN11314} = 0 \\
 &\text{c101) VOLDF119} + \text{VOLCA19} + \text{VOLTR119} - \text{FN12914} = 0 \\
 &\text{c102) FN12914} + \text{FN11314} - \text{FN11430} = 0 \\
 &\text{c103) VOLDF114} + \text{VOLCA14} + \text{VOLTR114} - \text{FN11617} = 0 \\
 &\text{c105) VOLDF126} + \text{VOLCA26} + \text{VOLTR126} + \text{FN11217} + \text{FN11617}
 \end{aligned}$$

- FN11718 = 0  
 c106) VOLDF123 + VOLCA23 + VOLTR123 + VOLDF117 + VOLCA17  
 + VOLTR117 + FN11718 - FN11819 = 0  
 c107) VOLDF111 + VOLCA11 + VOLTR111 + FN10526 - FN12627 = 0  
 C108) VOLDF102 + VOLCA02 + VOLTR102 - FN12122 = 0  
 c109) VOLDF106 + VOLCA06 + VOLTR106 + FN10222 + FN12322  
 + FN12122 - FN12225 = 0  
 c110) VOLDF108 + VOLCA08 + VOLTR108 - FN12322 = 0  
 d112) VOLDF110 + VOLCA10 + VOLTR110 + VOLDF124 + VOLCA24  
 + VOLTR124 + FN12225 - FN12527 = 0  
 c113) FN12627 + FN12527 - FN12719 = 0  
 c114) FN11819 + FN12719 - FN11920 = 0  
 c115) VOLDF118 + VOLCA18 + VOLTR118 + FN11920 - FN12030 = 0  
 c116) FN12030 + FN11430 - FN13009 = 0  
 C117) FN10931 - FN13132 = 0  
 D118) FN13132 - FN13234 = 0  
 D119) FN13234 - TRACOP - FN13436 = 0

#### !CONSTRUCCION Y MANTENCION DE CAMINOS EN VERANO

- d120) - 120000 R10203 + FN10203 <= 0  
 c121) - 120000 R10304 + FN10304 <= 0  
 c122) - 120000 R10405 + FN10405 <= 0  
 c123) - 120000 R10506 + FN10506 <= 0  
 c124) - 120000 R10607 + FN10607 <= 0  
 c125) - 120000 R10708 + FN10708 <= 0  
 c126) - 120000 R10809 + FN10809 <= 0  
 c127) - 120000 R10510 + FN10510 <= 0  
 c128) - 120000 R11012 + FN11012 <= 0  
 c129) - 120000 R11213 + FN11213 <= 0  
 c130) - 120000 R11314 + FN11314 <= 0  
 c131) - 120000 R11430 + FN11430 <= 0  
 c133) - 120000 R11217 + FN11217 <= 0  
 c134) - 120000 R11718 + FN11718 <= 0  
 c135) - 120000 R11819 + FN11819 <= 0  
 c136) - 120000 R11920 + FN11920 <= 0  
 c137) - 120000 R12030 + FN12030 <= 0  
 c138) - 120000 R12914 + FN12914 <= 0  
 c139) - 120000 R10222 + FN10222 <= 0  
 c141) - 120000 R12225 + FN12225 <= 0  
 c142) - 120000 R12527 + FN12527 <= 0  
 c143) - 120000 R12719 + FN12719 <= 0  
 c145) - 120000 B10002 - 120000 B30002 + FN10002 <= 0  
 C146) - 120000 B12122 - 120000 B32122 + FN12122 <= 0  
 c147) - 120000 B12322 - 120000 B32322 + FN12322 <= 0  
 c148) - 120000 B10526 - 120000 B30526 + FN10526 <= 0  
 d148) - 120000 B12627 - 120000 B32627 + FN12627 <= 0  
 c149) - 120000 B11617 - 120000 B31617 + FN11617 <= 0  
 c150) - 120000 B11112 - 120000 B31112 + FN11112 <= 0

- c151) - 120000 B12808 - 120000 B32808 + FN12808 <= 0
- !CONSERVACION DE FLUJO INVIERNO**
- c152) VOLDF203 + VOLTR203 - FN20002 = 0
- d154) FN20002 + VOLDF201 + VOLTR201 - FN20203 - FN20222 = 0
- c155) VOLDF204 + VOLTR204 + VOLDF205 + VOLTR205 + FN20203 - FN20304 = 0
- c156) VOLDF207 + VOLTR207 + FN20304 - FN20405 = 0
- c157) VOLDF227 + VOLTR227 + FN20405 - FN20526 - FN20510 - FN20506 = 0
- c158) VOLDF209 + VOLTR209 + VOLDF213 + VOLTR213 + FN20506 - FN20607 = 0
- d159) VOLDF216 + VOLTR216 + FN20607 - FN20708 = 0
- c160) VOLDF222 + VOLTR222 - FN22808 = 0
- c161) FN22808 + FN20708 - FN20809 = 0
- d162) VOLDF212 + VOLTR212 + VOLDF215 + VOLTR215 + FN20510 - FN21012 = 0
- c163) VOLDF225 + VOLTR225 - FN21112 = 0
- c164) VOLDF220 + VOLTR220 + FN21112 + FN21012 - FN21213 - FN21217 = 0
- c165) VOLDF221 + VOLTR221 + FN21213 - FN21314 = 0
- C166) VOLDF219 + VOLTR219 - FN22914 = 0
- D167) FN22914 + FN21314 - FN21430 = 0
- d168) VOLDF214 + VOLTR214 - FN21617 = 0
- d170) VOLDF226 + VOLTR226 + FN21217 + FN21617 - FN21718 = 0
- c171) VOLDF223 + VOLTR223 + VOLDF217 + VOLTR217 + FN21718 - FN21819 = 0
- c172) VOLDF211 + VOLTR211 + FN20526 - FN22627 = 0
- C173) VOLDF202 + VOLTR202 - FN22122 = 0
- c174) VOLDF206 + VOLTR206 + FN20222 + FN22322 + FN22122 - FN22225 = 0
- c175) VOLDF208 + VOLTR208 - FN22322 = 0
- d177) VOLDF210 + VOLTR210 + VOLDF224 + VOLTR224 + FN22225 - FN22527 = 0
- c178) FN22627 + FN22527 - FN22719 = 0
- c179) FN21819 + FN22719 - FN21920 = 0
- c180) VOLDF218 + VOLTR218 + FN21920 - FN22030 = 0
- c181) FN22030 + FN21430 - FN23009 = 0
- C182) FN20931 - FN23132 = 0
- D182) FN23132 - FN23234 = 0
- C183) FN23234 + ACOPDF - FN23436 = 0
- !CONSTRUCCION Y MANTENCION DE CAMINOS EN INVIERNO**
- d185) - 120000 R20203 + FN20203 <= 0
- c186) - 120000 R20304 + FN20304 <= 0
- c187) - 120000 R20405 + FN20405 <= 0
- c188) - 120000 R20506 + FN20506 <= 0
- c189) - 120000 R20607 + FN20607 <= 0
- c190) - 120000 R20708 + FN20708 <= 0



c191) - 120000 R20809 + FN20809 <= 0  
 c192) - 120000 R20510 + FN20510 <= 0  
 c193) - 120000 R21012 + FN21012 <= 0  
 c194) - 120000 R21213 + FN21213 <= 0  
 c195) - 120000 R21314 + FN21314 <= 0  
 c196) - 120000 R21430 + FN21430 <= 0  
 c198) - 120000 R21217 + FN21217 <= 0  
 c199) - 120000 R21718 + FN21718 <= 0  
 c200) - 120000 R21819 + FN21819 <= 0  
 c201) - 120000 R21920 + FN21920 <= 0  
 c202) - 120000 R22030 + FN22030 <= 0  
 c203) - 120000 R22914 + FN22914 <= 0  
 c204) - 120000 R20222 + FN20222 <= 0  
 c206) - 120000 R22225 + FN22225 <= 0  
 c207) - 120000 R22527 + FN22527 <= 0  
 c208) - 120000 R22719 + FN22719 <= 0  
 c210) - 120000 B20002 - 120000 B30002 + FN20002 <= 0  
 C211) - 120000 B22122 - 120000 B32122 + FN22122 <= 0  
 c212) - 120000 B22322 - 120000 B32322 + FN22322 <= 0  
 c213) - 120000 B20526 - 120000 B30526 + FN20526 <= 0  
 d213) - 120000 B22627 - 120000 B32627 + FN22627 <= 0  
 c214) - 120000 B21617 - 120000 B31617 + FN21617 <= 0  
 c215) - 120000 B21112 - 120000 B31112 + FN21112 <= 0  
 c216) - 120000 B22808 - 120000 B32808 + FN22808 <= 0

!RESTRICCION QUE OBLIGA A QUE EL FLUJO HACIA UN DESTINO SEA  
!IGUAL

!A LA SUMA DE LOS VOLUMENES POR RODAL ENVIADOS HACIA ESE  
DESTINO

c217) VOLTR101 + VOLTR102 + VOLTR103 + VOLTR104 + VOLTR105  
 + VOLTR106 + VOLTR107 + VOLTR108 + VOLTR109 + VOLTR110  
 + VOLTR111 + VOLTR112 + VOLTR113 + VOLTR114 + VOLTR115  
 + VOLTR116 + VOLTR117 + VOLTR118 + VOLTR119 + VOLTR120  
 + VOLTR121 + VOLTR122 + VOLTR123 + VOLTR124 + VOLTR125  
 + VOLTR126 + VOLTR127 - FN13233 = 0

c218) VOLTR201 + VOLTR202 + VOLTR203 + VOLTR204 + VOLTR205  
 + VOLTR206 + VOLTR207 + VOLTR208 + VOLTR209 + VOLTR210 +  
 VOLTR211  
 + VOLTR212 + VOLTR213 + VOLTR214 + VOLTR215 + VOLTR216 +  
 VOLTR217  
 + VOLTR218 + VOLTR219 + VOLTR220 + VOLTR221 + VOLTR222 +  
 VOLTR223  
 + VOLTR224 + VOLTR225 + VOLTR226 + VOLTR227 - FN23233 = 0

c219) TRACOP + VOLCA01 + VOLCA02 + VOLCA03 + VOLCA04 +  
 VOLCA05  
 + VOLCA06 + VOLCA07 + VOLCA08 + VOLCA09 + VOLCA10 + VOLCA11  
 + VOLCA12 + VOLCA13 + VOLCA14 + VOLCA15 + VOLCA16 + VOLCA17  
 + VOLCA18 + VOLCA19 + VOLCA20 + VOLCA21 + VOLCA22 + VOLCA23

+ VOLCA24 + VOLCA25 + VOLCA26 + VOLCA27 - FN13435 = 0  
 c220) TRODF1 + VOLDF101 + VOLDF102 + VOLDF103 + VOLDF104 +  
 VOLDF105  
 + VOLDF106 + VOLDF107 + VOLDF108 + VOLDF109 + VOLDF110 +  
 VOLDF111  
 + VOLDF112 + VOLDF113 + VOLDF114 + VOLDF115 + VOLDF116 +  
 VOLDF117  
 + VOLDF118 + VOLDF119 + VOLDF120 + VOLDF121 + VOLDF122 +  
 VOLDF123  
 + VOLDF124 + VOLDF125 + VOLDF126 + VOLDF127 - FN13436 = 0  
 c221) ACOPDF + TRODF2 + VOLDF201 + VOLDF202 + VOLDF203 +  
 VOLDF204  
 + VOLDF205 + VOLDF206 + VOLDF207 + VOLDF208 + VOLDF209 +  
 VOLDF210  
 + VOLDF211 + VOLDF212 + VOLDF213 + VOLDF214 + VOLDF215 +  
 VOLDF216  
 + VOLDF217 + VOLDF218 + VOLDF219 + VOLDF220 + VOLDF221 +  
 VOLDF222  
 + VOLDF223 + VOLDF224 + VOLDF225 + VOLDF226 + VOLDF227  
 - FN23436 = 0

END

SUB R10203 1.00000  
 INTE R10203  
 SUB R20203 1.00000  
 INTE R20203  
 SUB R10304 1.00000  
 INTE R10304  
 SUB R20304 1.00000  
 INTE R20304  
 SUB R10405 1.00000  
 INTE R10405  
 SUB R20405 1.00000  
 INTE R20405  
 SUB R10506 1.00000  
 INTE R10506  
 SUB R20506 1.00000  
 INTE R20506  
 SUB R10607 1.00000  
 INTE R10607  
 SUB R20607 1.00000  
 INTE R20607  
 SUB R10708 1.00000  
 INTE R10708  
 SUB R20708 1.00000  
 INTE R20708  
 SUB R10809 1.00000  
 INTE R10809

SUB	R20809	1.00000
INTE	R20809	
SUB	R10510	1.00000
INTE	R10510	
SUB	R20510	1.00000
INTE	R20510	
SUB	R11012	1.00000
INTE	R11012	
SUB	R21012	1.00000
INTE	R21012	
SUB	R11213	1.00000
INTE	R11213	
SUB	R21213	1.00000
INTE	R21213	
SUB	R11314	1.00000
INTE	R11314	
SUB	R21314	1.00000
INTE	R21314	
SUB	R11430	1.00000
INTE	R11430	
SUB	R21430	1.00000
INTE	R21430	
SUB	R11217	1.00000
INTE	R11217	
SUB	R21217	1.00000
INTE	R21217	
SUB	R11718	1.00000
INTE	R11718	
SUB	R21718	1.00000
INTE	R21718	
SUB	R11819	1.00000
INTE	R11819	
SUB	R21819	1.00000
INTE	R21819	
SUB	R11920	1.00000
INTE	R11920	
SUB	R21920	1.00000
INTE	R21920	
SUB	R12030	1.00000
INTE	R12030	
SUB	R22030	1.00000
INTE	R22030	
SUB	R10222	1.00000
INTE	R10222	
SUB	R20222	1.00000
INTE	R20222	
SUB	R12225	1.00000

INTE	R12225	
SUB	R22225	1.00000
INTE	R22225	
SUB	R12527	1.00000
INTE	R12527	
SUB	R22527	1.00000
INTE	R22527	
SUB	R12719	1.00000
INTE	R12719	
SUB	R22719	1.00000
INTE	R22719	
SUB	R12914	1.00000
INTE	R12914	
SUB	R22914	1.00000
INTE	R22914	
SUB	B10002	1.00000
INTE	B10002	
SUB	B20002	1.00000
INTE	B20002	
SUB	B30002	1.00000
INTE	B30002	
SUB	B12122	1.00000
INTE	B12122	
SUB	B22122	1.00000
INTE	B22122	
SUB	B32122	1.00000
INTE	B32122	
SUB	B12322	1.00000
INTE	B12322	
SUB	B22322	1.00000
INTE	B22322	
SUB	B32322	1.00000
INTE	B32322	
SUB	B10526	1.00000
INTE	B10526	
SUB	B20526	1.00000
INTE	B20526	
SUB	B30526	1.00000
INTE	B30526	
SUB	B12627	1.00000
INTE	B12627	
SUB	B22627	1.00000
INTE	B22627	
SUB	B32627	1.00000
INTE	B32627	
SUB	B11617	1.00000
INTE	B11617	

SUB	B21617	1.00000
INTE	B21617	
SUB	B31617	1.00000
INTE	B31617	
SUB	B11112	1.00000
INTE	B11112	
SUB	B21112	1.00000
INTE	B21112	
SUB	B31112	1.00000
INTE	B31112	
SUB	B12808	1.00000
INTE	B12808	
SUB	B22808	1.00000
INTE	B22808	
SUB	B32808	1.00000
INTE	B32808	
SUB	I01	1.00000
INTE	I01	
SUB	I02	1.00000
INTE	I02	
SUB	I03	1.00000
INTE	I03	
SUB	I04	1.00000
INTE	I04	
SUB	I05	1.00000
INTE	I05	
SUB	I06	1.00000
INTE	I06	
SUB	I07	1.00000
INTE	I07	
SUB	I08	1.00000
INTE	I08	
SUB	I09	1.00000
INTE	I09	
SUB	I10	1.00000
INTE	I10	
SUB	I11	1.00000
INTE	I11	
SUB	I12	1.00000
INTE	I12	
SUB	I13	1.00000
INTE	I13	
SUB	I14	1.00000
INTE	I14	
SUB	I15	1.00000
INTE	I15	
SUB	I16	1.00000

INTE	I16	
SUB	I17	1.00000
INTE	I17	
SUB	I18	1.00000
INTE	I18	
SUB	I19	1.00000
INTE	I19	
SUB	I20	1.00000
INTE	I20	
SUB	I21	1.00000
INTE	I21	
SUB	I22	1.00000
INTE	I22	
SUB	I23	1.00000
INTE	I23	
SUB	I24	1.00000
INTE	I24	
SUB	I25	1.00000
INTE	I25	
SUB	I26	1.00000
INTE	I26	
SUB	I27	1.00000
INTE		

**APÉNDICE N°2:**  
**TABLA DE RESULTADOS INTERPRETADOS**

1) VALOR DE LA FUNCIÓN OBJETIVO      US\$ 15.111.080  
 N° DE ITERACIONES = 498.085  
 N° DE RAMAS      = 19.602

2) SELECCIÓN DE RODALES PARA COSECHAR EN VERANO.

VARIABLE	VALOR
I01	0
I02	0
I03	0
I06	0
I08	0
I09	0
I10	0
I11	0
I13	0

VARIABLE	VALOR
I14	0
I16	0
I17	0
I18	0
I22	0
I23	0
I24	0
I25	0
I26	0

3) SELECCIÓN DE RODALES PARA COSECHAR EN INVIERNO.

VARIABLE	VALOR
I04	1
I05	1
I07	1
I12	1
I15	1
I19	1
I20	1
I21	1
I27	1

## 4) CAMINOS EXISTENTES UTILIZADOS EN VERANO.

VARIABLE	VALOR
R10203	1
R10304	1
R10405	1
R10506	1
R10607	1
R10708	1
R10809	1
R11213	1

VARIABLE	VALOR
R11314	1
R11430	1
R11718	1
R11819	1
R11920	1
R12030	1
R12225	1
R12527	1
R12719	1

## 5) CAMINOS EXISTENTES UTILIZADOS EN INVIERNO.

VARIABLE	VALOR
R20304	1
R20405	1
R20506	1
R20607	1
R20708	1
R20809	1
R21012	1
R21213	1
R21314	1
R21430	1
R22914	1

## 6) CAMINOS EN PROYECTO CONSTRUIDOS PARA SER UTILIZADOS EN VERANO.

VARIABLE	VALUE
B10002	1
B10526	0
B11112	1
B11617	1
B12122	1
B12322	1
B12627	1
B12808	1



## 7) CAMINOS EN PROYECTO CONSTRUIDOS PARA SER UTILIZADOS EN INVIERNO.

VARIABLE	VALUE
B20002	0
B20526	0
B21112	0
B21617	0
B22122	0
B22322	0
B22627	0
B22808	0

## 8) CAMINOS EN PROYECTO CONSTRUIDOS PARA SER UTILIZADOS EN AMBAS TEMPORADAS.

VARIABLE	VALUE
B30002	0
B30526	0
B31112	0
B31617	0
B32122	0
B32322	0
B32627	0
B32808	0

## 9) VOLUMEN POR RODAL ENVIADO A DESTINO FINA EN VERANO.

VARIABLE	VALOR
VOLDF101	439
VOLDF102	4235
VOLDF103	5328
VOLDF104	0
VOLDF105	0
VOLDF106	2112
VOLDF107	0
VOLDF108	2006
VOLDF109	2244
VOLDF110	569
VOLDF111	4758
VOLDF112	0
VOLDF113	1778
VOLDF114	2306

VARIABLE	VALOR
VOLDF115	0
VOLDF116	786
VOLDF117	708
VOLDF118	1185
VOLDF119	0
VOLDF120	0
VOLDF121	0
VOLDF122	1847
VOLDF123	1587
VOLDF124	3543
VOLDF125	1570
VOLDF126	1003
VOLDF127	0

## 10) VOLUMEN POR RODAL ENVIADO A DESTINO FINA EN INVIERNO.

VARIABLE	VALOR
VOLDF201	0
VOLDF202	0
VOLDF203	0
VOLDF204	3195
VOLDF205	3971
VOLDF206	0
VOLDF207	387
VOLDF208	0
VOLDF209	0
VOLDF210	0
VOLDF211	0
VOLDF212	3971
VOLDF213	0
VOLDF214	0

VARIABLE	VALOR
VOLDF215	1605
VOLDF216	0
VOLDF217	0
VOLDF218	0
VOLDF219	1003
VOLDF220	739
VOLDF221	1451
VOLDF222	0
VOLDF223	0
VOLDF224	0
VOLDF225	0
VOLDF226	0
VOLDF227	1270

## 11) VOLUMEN POR RODAL ENVIADO A CANCHA DE TROZADO EN VERANO.

VARIABLE	VALOR
VOLTR101	440
VOLTR102	0
VOLTR103	5328
VOLTR104	0
VOLTR105	0
VOLTR106	1901
VOLTR107	0
VOLTR108	2005
VOLTR109	2244
VOLTR110	569
VOLTR111	4757
VOLTR112	0
VOLTR113	1777
VOLTR114	2300

VARIABLE	VALOR
VOLTR115	0
VOLTR116	785
VOLTR117	707
VOLTR118	1184
VOLTR119	0
VOLTR120	0
VOLTR121	0
VOLTR122	1847
VOLTR123	1586
VOLTR124	0
VOLTR125	1570
VOLTR126	1000
VOLTR127	0

## 12) VOLUMEN POR RODAL ENVIADO A CANCHA DE TROZADO EN INVIERNO.

VARIABLE	VALOR
VOLTR201	0
VOLTR202	0
VOLTR203	0
VOLTR204	3195
VOLTR205	3970
VOLTR206	0
VOLTR207	386
VOLTR208	0
VOLTR209	0
VOLTR210	0
VOLTR211	0
VOLTR212	3970
VOLTR213	0
VOLTR214	0

VARIABLE	VALOR
VOLTR215	1605
VOLTR216	0
VOLTR217	0
VOLTR218	0
VOLTR219	1000
VOLTR220	738
VOLTR221	1450
VOLTR222	0
VOLTR223	0
VOLTR224	0
VOLTR225	0
VOLTR226	0
VOLTR227	1270

## 13) VOLUMEN POR RODAL ENVIADO A CANCHA DE ACOPIO EN VERANO.

VARIABLE	VALOR
VOLCA01	0
VOLCA02	0
VOLCA03	0
VOLCA04	0
VOLCA05	0
VOLCA06	0
VOLCA07	0
VOLCA08	0
VOLCA09	0
VOLCA10	0
VOLCA11	0
VOLCA12	0
VOLCA13	0
VOLCA14	0

VARIABLE	VALOR
VOLCA15	0
VOLCA16	0
VOLCA17	0
VOLCA18	0
VOLCA19	0
VOLCA20	0
VOLCA21	0
VOLCA22	0
VOLCA23	0
VOLCA24	0
VOLCA25	0
VOLCA26	0
VOLCA27	0

## 14) VOLUMEN ENVIADO DESDE LA CANCHA DE TROZADO A LA CANCHA DE ACOPIO EN VERANO.

VARIABLE	VALOR
TRACOP	0

15) VOLUMEN ENVIADO DESDE LA CANCHA DE TROZADO AL DESTINO FINAL EN VERANO.

VARIABLE	VALOR
TRODF1	30000

16) VOLUMEN ENVIADO DESDE LA CANCHA DE TROZADO AL DESTINO FINAL EN VERANO.

VARIABLE	VALOR
TRODF2	17584

17) VOLUMEN ENVIADO DESDE LA CANCHA DE ACOPIO AL DESTINO FINAL EN INVIERNO

VARIABLE	VALOR
ACOPDF	0

18) FLUJO QUE PASA A TRAVÉS DE LOS ARCOS DE CAMINOS EN VERANO.

VARIABLE	VALOR
FN10002	10656
FN10203	11535
FN10222	0
FN10304	11535
FN10405	11535
FN10506	11535
FN10510	0
FN10526	0
FN10607	19578
FN10708	21149
FN10809	24843
FN10931	68004
FN11012	0
FN11112	3140
FN11213	3140
FN11217	0
FN11314	3140
FN11430	3140
FN11617	4606

VARIABLE	VALOR
FN11718	6609
FN11819	11197
FN11920	37652
FN12030	40021
FN12122	4235
FN12225	12259
FN12322	4011
FN12527	16940
FN12627	9515
FN12719	26455
FN12808	3694
FN12914	0
FN13009	43161
FN13132	68004
FN13233	30000
FN13234	68004
FN13435	0
FN13436	68004

## 19) FLUJO QUE PASA A TRAVÉS DE LOS ARCOS DE CAMINOS EN INVIERNO.

VARIABLE	VALOR
FN20002	0
FN20203	0
FN20222	0
FN20304	14331
FN20405	15104
FN20506	17644
FN20510	0
FN20526	0
FN20607	17644
FN20708	17644
FN20809	17644
FN20931	35176
FN21012	11151
FN21112	0
FN21213	12628
FN21217	2003
FN21314	15529
FN21430	17532

VARIABLE	VALOR
FN21617	0
FN21718	0
FN21819	0
FN21920	0
FN22030	0
FN22122	0
FN22225	0
FN22322	0
FN22527	0
FN22627	0
FN22719	0
FN22808	0
FN22914	2003
FN23009	17532
FN23132	35176
FN23233	17584
FN23234	35176
FN23436	35176

### APÉNDICE N°3: Formulación del Problema General.

Dado que el problema general es una extensión de la formulación particular, sólo se mencionarán los índices, variables, coeficientes técnicos y recursos adicionales.

1.- Índices adicionales:

$c$  = cancha de acopio;  $c = 1, \dots, C$

$y$  = cancha de trozado,  $y = 1, \dots, Y$

2.- Variables de decisión adicionales:

$VOLCA_{ic}$  = volumen del rodal "i" enviado a la cancha de acopio "c" en la temporada de verano.

$VOLTR_{iy}^t$  = volumen del rodal "i" enviado a la cancha de trozado "y" en la temporada "t".

$VOLTER_c^t$  = volumen de madera comprada a terceros durante la temporada "t" enviada a la cancha de acopio "c".

$VOLTER^t$  = volumen de madera comprada a terceros durante la temporada "t" enviada a destino final.

$ACOPDF_c$  = volumen de madera enviada desde la cancha de acopio "c" al destino final en la temporada de invierno.

$TRODF_y^t$  = Volumen de madera enviada desde la cancha de trozado "y" al

destino final durante la temporada “t”.

$TRACOP_{yc}$  = Volumen de madera enviada desde la cancha de trozado “y” a la cancha de acopio “c” en la temporada de verano.

$I_i^t$  = Variable binaria

$I_i^t$  = 1 si el rodal “i” se cosecha en la temporada “t”.  
0 si se cosecha.

### 3.- Coeficientes técnicos adicionales:

$TACOP_{ic}^t$  = costo de transporte (US\$/m<sup>3</sup>) desde el rodal “i” hacia la cancha de acopio “c” en la temporada “t”.

$TTROZ_{iy}^t$  = costo de transporte (US\$/m<sup>3</sup>) desde el rodal “i” hacia la cancha de trozado “y” en la temporada “t”.

$TTROZAC_{yc}^t$  = costo de transporte (US\$/m<sup>3</sup>) desde la cancha de trozado “y” hacia la cancha de acopio “c” en la temporada “t”.

$TROZDF_y^t$  = costo de transporte (US\$/m<sup>3</sup>) desde la cancha de trozado “y” hacia el destino final en la temporada “t”.

$TACOPDF_c$  = costo de transporte (US\$/m<sup>3</sup>) desde la cancha de acopio “c” hacia el destino final.

$CTERC_c$  = costo de la madera de terceros puesta en la cancha “c” (US\$/m<sup>3</sup>).

$CTERC$  = costo de la madera de terceros puesta en el destino final (US\$/m<sup>3</sup>).

4.- Vector de recursos adicionales:

$ACOPMAX_c$  = Capacidad máxima de la cancha de acopio "c" ( $m^3$ ).

$STOCKI_c$  = Stock inicial de la cancha de acopio "c" ( $m^3$ ).

$STOCKF_c$  = Stock final de la cancha de acopio "c" ( $m^3$ ).

$TROZMAX_y$  = Capacidad máxima de la cancha de trozado "y" ( $m^3$ ).

5.- Restricciones.

5.1.- Demanda mínima de verano.

$$\sum_i^r VOLDF_i^1 + \sum_i^r \sum_c^C VOLCA_{ic} + \sum_i^r \sum_y^Y VOLTR_{iy}^1 + \sum_c^C VOLTER_c^t + VOLTER^t \geq DDAVER$$

5.2.- Demanda mínima de invierno.

$$\sum_i^r VOLDF_i^2 + \sum_i^r \sum_y^Y VOLTR_{iy}^2 + ACOPDF_c + VOLTER^t \geq DDAINV$$

5.3.- Si el rodal se cosecha en verano se tiene:

$$VOLDF_j^1 + \sum_c^C VOLCA_{ic} + \sum_y^Y VOLTR_{iy}^1 - VOLTOT_i * I_i^1 = 0 \quad ; \forall i$$



b) Cancha de trozado.

$$\sum_{i=1}^r \sum_y^Y \text{VOLTR}_{iy}^t - \text{FLUJO}_{ni,nf}^t = 0 \quad ; \quad \forall t$$

donde nf corresponde al nodo que caracteriza a la cancha de trozado.

c) Planta industrial (verano).

$$\sum_{i=1}^r \text{VOLDF}_i^1 + \sum_y^Y \text{TROZDF}_y^1 - \text{FLUJO}_{ni,nf}^1 = 0$$

donde nf corresponde al nodo que caracteriza a la planta industrial.

d) Planta industrial (invierno).

$$\sum_{i=1}^r \text{VOLDF}_i^2 + \sum_c^C \text{ACOPDF} + \sum_y^Y \text{TRODF}_y^2 - \text{FLUJO}_{ni,nf}^2 = 0$$

donde nf corresponde al nodo que caracteriza a la planta industrial.

## 6.- Función objetivo.

### MINIMIZAR

$Z =$  Costo de Cosecha + Costo de Transporte + Costo de Caminos + Costo generado en cancha + Costo de Penalización por Cosecha en Invierno + Costo de Oportunidad del Capital.

donde:

#### 4.6.1.- Costo de cosecha:

$$\sum_i^r CCOS_i * VOLTOT_i * I_i^1 + \sum_i^r CCOS_i * VOLTOT_i * I_i^2$$

#### 4.6.2.- Costo de transporte:

##### a) Rodal-destino final.

$$\sum_{t=1}^2 \sum_i^r TDFINAL_i^t * VOLDF_i^t$$

##### b) Rodal-cancha de acopio.

$$\sum_i^r \sum_c^C TACOP_{ic} * VOLCA_{ic}$$

##### c) Rodal-cancha de trozado.

$$\sum_{t=1}^2 \sum_i^r \sum_y^Y TTROZ_{iy}^t * VOLTRO_{iy}^t$$

d) Cancha de trozado-canCHA de acopio.

$$\sum_y^Y \sum_c^C \text{TTROZAC}_{yc} * \text{TRACOP}_{yc}$$

e) Cancha de trozado-destino final.

$$\sum_{t=1}^2 \sum_y^Y \text{TROZDF}_y^t * \text{TRODF}_y^t$$

f) Cancha de acopio-destino final.

$$\sum_c^C \text{TACOPDF}_c * \text{ACOPDF}_c$$

g) Costo de transporte asociado a los nodos ficticios (ni-nf).

$$\sum_{t=1}^2 \sum_{ni,nf} \text{TNODO}_{ni,nf}^t * \text{FLUJO}_{ni,nf}^t$$

4.6.3.- Costo de caminos:

a) Caminos existentes.

$$\sum_{ni,nf} (\text{CMANT}_{ni,nf}^1 * R_{ni,nf}^1 + \text{CMANT}_{ni,nf}^2 * R_{ni,nf}^2)$$

b) Caminos en proyecto.

$$\sum_{ni,nf} (\text{CCAMVER}_{ni,nf} * b_{ni,nf}^1 + \text{CCAMINV}_{ni,nf} * b_{ni,nf}^2 + \text{CVERINV}_{ni,nf} * b_{ni,nf}^3)$$

#### 4.6.4.- Costo generado en cancha.

a) Cancha de acopio.

$$\sum_c^C \text{CACOP}_c * \text{ACOPDF}_c$$

b) Cancha de trozado.

$$\sum_{t=1}^2 \sum_y^Y \sum_c^C \text{CTROZ}_y^t * (\text{TROZDF}_y^t + \text{TRACOP}_{yc})$$

#### 4.6.5.- Costo penalización por selección de rodales en invierno.

$$\sum_{t=1}^2 \sum_i^r \text{CPEN}_i * I_i^t$$

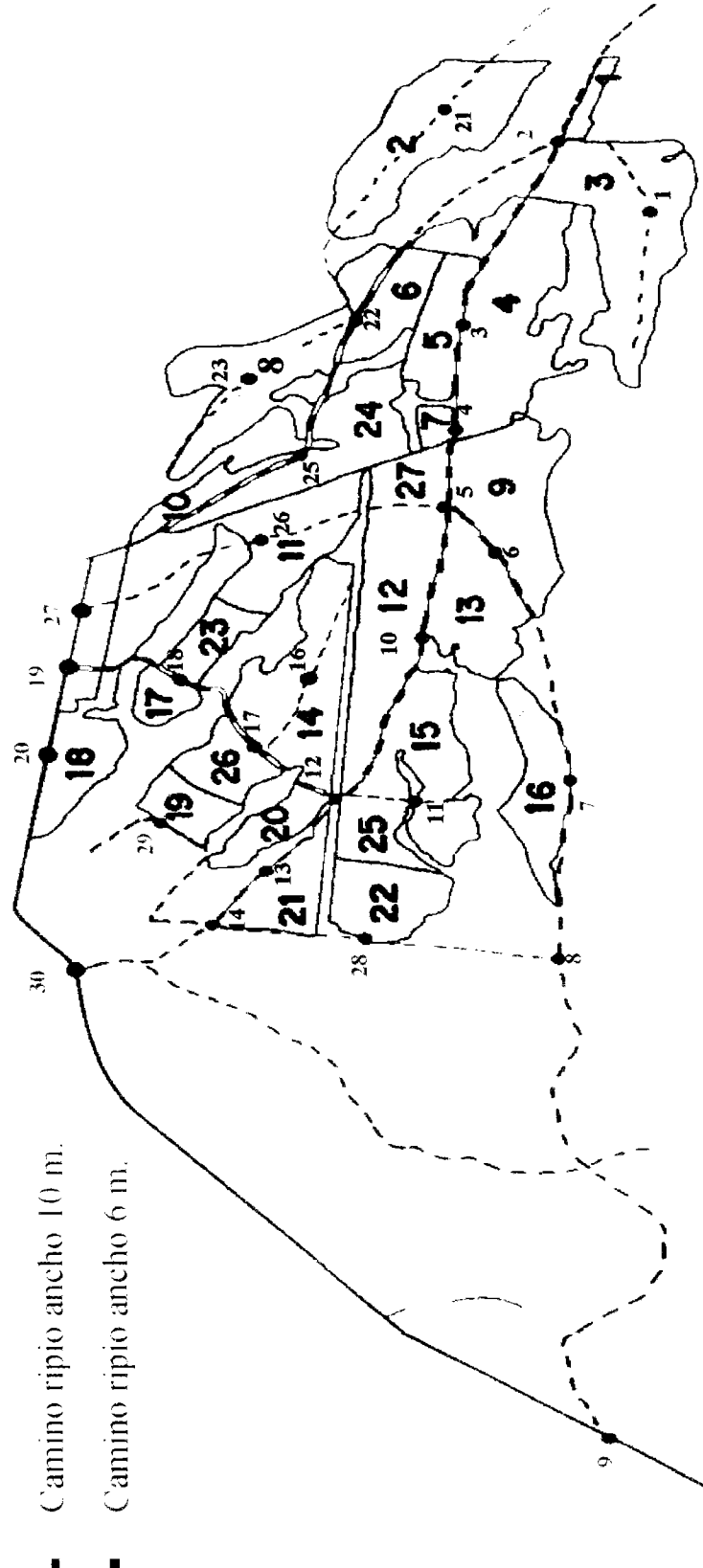
#### 4.6.6.- Costo de oportunidad del capital:

$$\sum_{i=1}^r \sum_c^C (\text{VOLCA}_{ic} * (\text{CCOS}_i + \text{TACOP}_{ic}) + \text{VOLTER}_c * \text{CTERC}_c) * \text{TD}^6$$

#### 4.6.7.- Costo de la madera de terceros:

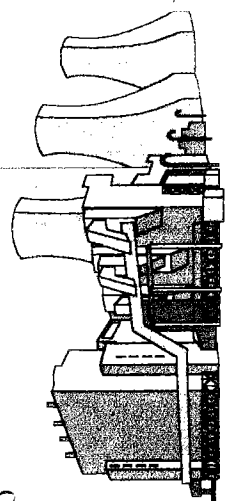
$$\sum_{i=1}^r \sum_c^C (\text{VOLTER}_c * \text{CTERC}_c) + \sum_{t=1}^2 (\text{VOLTER}^t * \text{CTERC}^t)$$

- - - - Camino en proyecto
- - - - Camino de tierra
- ==== Camino ripio ancho 10 m.
- ==== Camino ripio ancho 6 m.



Cancha de Trozado

Cancha de Acopio



Planta Industrial

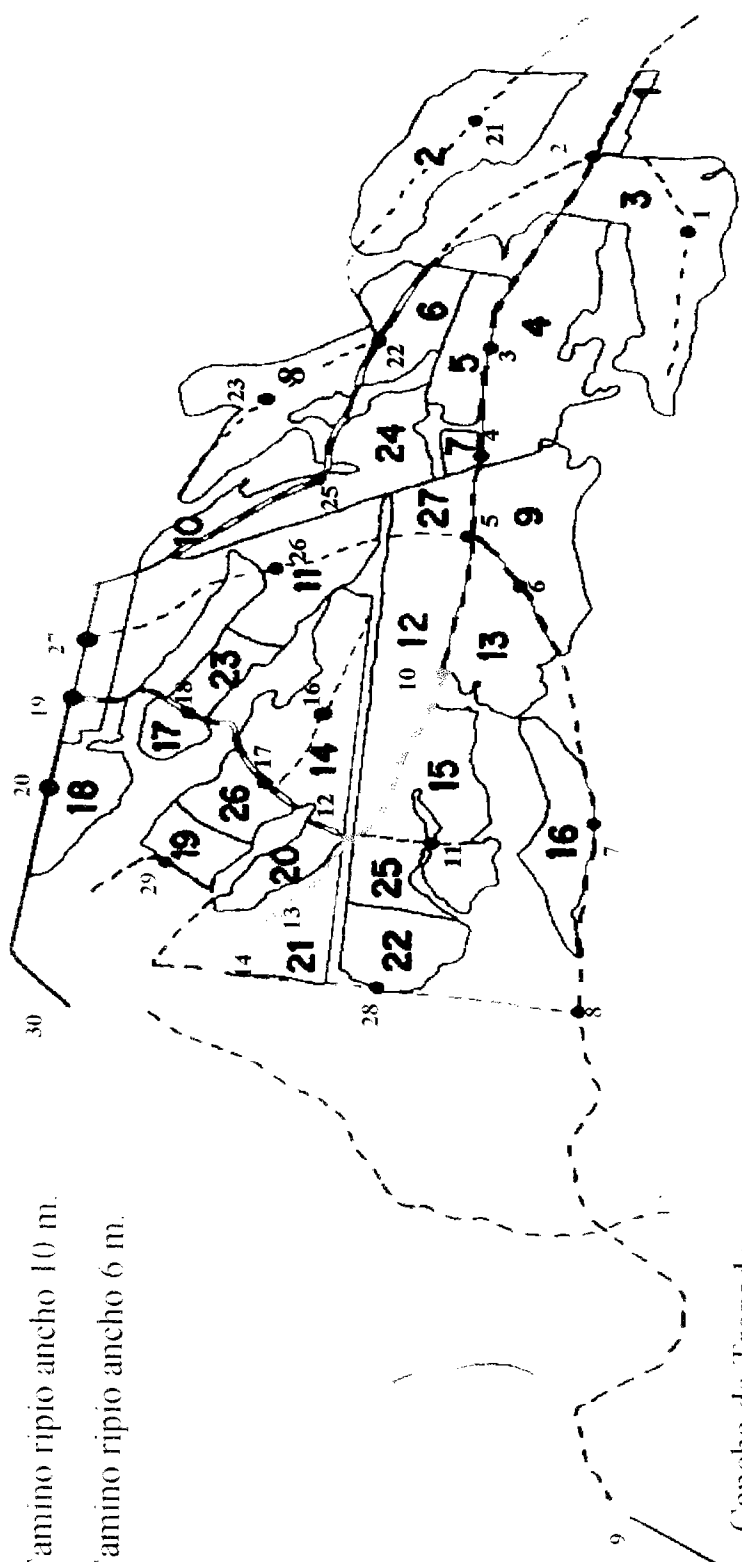
n : Número de nodos

N : Número de Rodal.

**APÉNDICE N°5:**  
**Plano del Problema Particular**  
**con Demanda Mínima de Invierno Igual a 10.000 m<sup>3</sup>**

**Demanda Invierno : 10.000 m<sup>3</sup>**

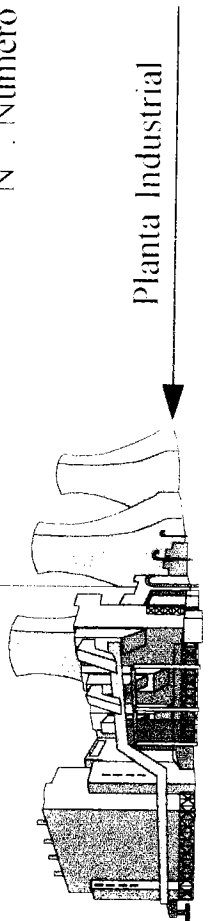
- - - Camino en proyecto
- - - Camino de tierra
- Camino ripio ancho 10 m.
- Camino ripio ancho 6 m.



Cancha de Trozado  
 30.000 m<sup>3</sup> verano  
 4.056 m<sup>3</sup> invierno

Cancha de Acopio  
 0 m<sup>3</sup>

n : Número de nodos  
 N : Número de Rodal.



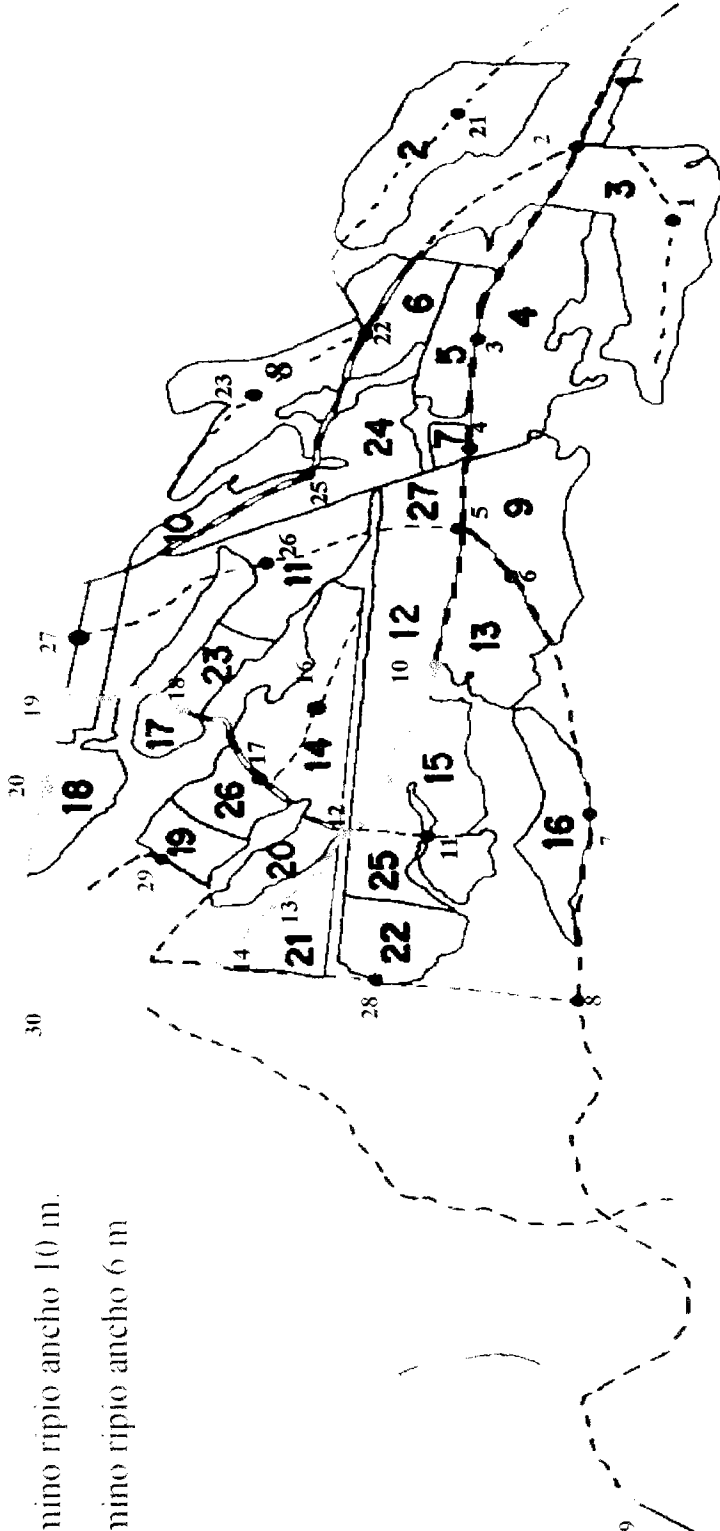
Planta Industrial

**APÉNDICE N°6:**  
**Plano del Problema Particular**  
**con Demanda Mínima de Invierno Igual a 20.000 m<sup>3</sup>**



**Demanda Invierno : 20.000 m<sup>3</sup>**

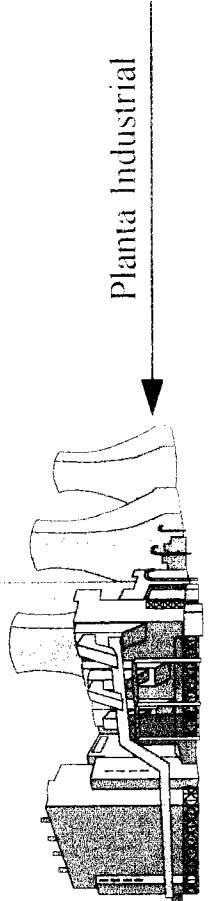
- - - Camino en proyecto
- - - Camino de tierra
- Camino ripio ancho 10 m.
- Camino ripio ancho 6 m



Cancha de Trozado  
 30.000 m<sup>3</sup> verano  
 11.248 m<sup>3</sup> invierno

Cancha de Acopio  
 0 m<sup>3</sup>

n : Número de nodos  
 N : Número de Rodal.



Planta Industrial

**APÉNDICE N°7:**  
**Plano del Problema Particular (Problema Base)**  
**con Demanda Mínima de Invierno Igual a 35.000 m<sup>3</sup>**

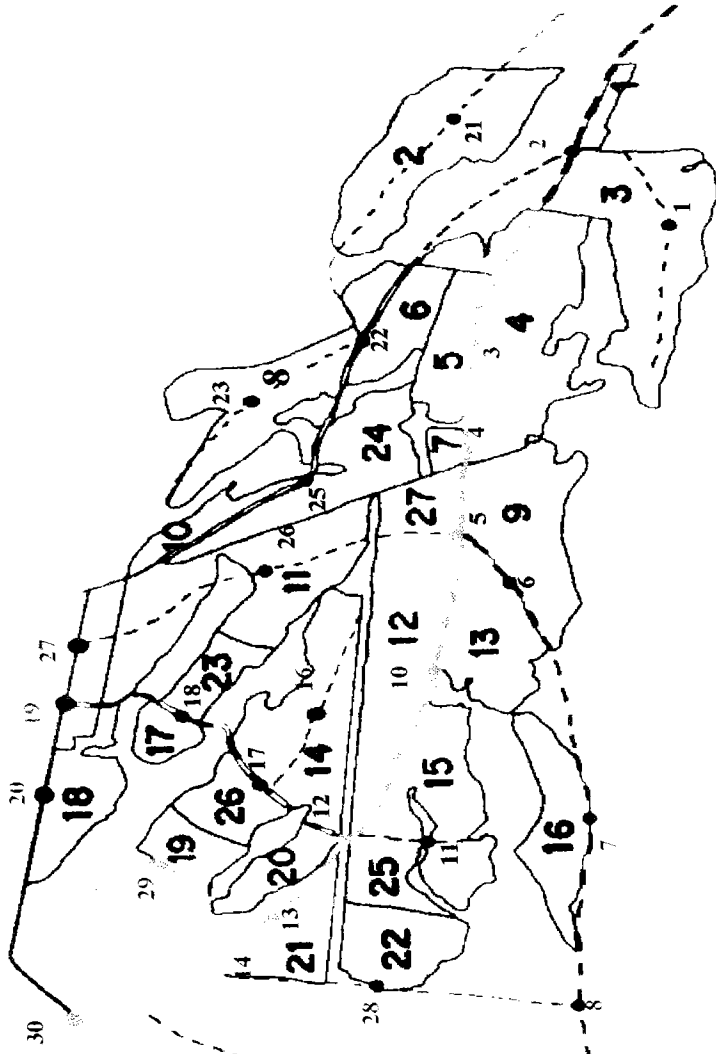
**Demanda Invierno : 35.000 m<sup>3</sup>**

----- Camino en proyecto

- - - - - Camino de tierra

===== Cammu ripio ancho 10 m.

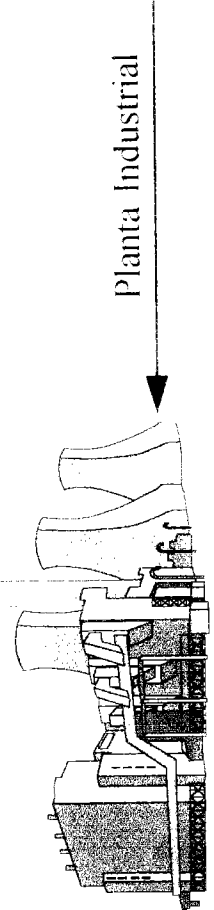
===== Cammu ripio ancho 6 m.



Cancha de Trozado  
30.000 m<sup>3</sup> verano  
17.056 m<sup>3</sup> invierno

Cancha de Acopio  
0 m<sup>3</sup>

n : Número de nodos  
N : Número de Rodal.



Planta Industrial