

***GUIA PRACTICA Y TEORICA PARA
EL DISEÑO DE UN INVENTARIO
FORESTAL DE RECONOCIMIENTO***

Documento Técnico 21/1995

Agosto 1995

Guia Practica y Teorica para el Diseño de un Inventario Forestal de Reconocimiento

Proyecto BOLFOR
Calle Prolongación Beni 149
Santa Cruz, Bolivia

USAID Contrato: 511-0621-C-00-3027

Erhard Duaber

Agosto, 1995

*BOLFOR es un proyecto financiado por USAID y el Gobierno de Bolivia e implementado por
Chemonics International, con la asistencia técnica de Conservation International,
Tropical Research and Development y el Wildlife Conservation Society*

TABLA DE CONTENIDO

		Página
SECCION I	INTRODUCCION	I-1
SECCION II	MUESTREO Y PARAMETROS ESTADISTICOS	II-1
	A. Media Aritmética	II-1
	B. Valores de Dispersión	II-1
	C. Error Standard	II-3
	D. Límites de Confianza y Error Admisible	II-4
	E. Interpretación de los Límites de Confianza	II-5
	F. Significado del Error Standard y Límites de Confianza	II-5
	G. Estimación del Tamaño de la Muestra	II-6
SECCION III	FORMA Y TAMAÑO DE LAS UNIDADES DE MUESTREO	III-1
	A. Parcelas Fijas	III-1
	B. Muestreo Goniométrico	III-1
SECCION IV	METODOS DE MUESTREO	IV-1
	A. Muestreo por Azar Simple y otros Métodos de Muestreo	IV-1
	B. Muestreo por Bloques	IV-2
	C. Muestreo a Varios Niveles (Multi-stage sampling)	IV-2
	D. Muestreo con Probabilidades Distintas de Selección	IV-2
	E. Muestreo Estratificado	IV-2
	F. Muestreo Sistemático	IV-3
SECCION V	DISEÑO DE UN MUESTREO SISTEMATICO	V-1
	A. Problema de Optimización	V-1
	B. Consideraciones para una Solución Pragmática	V-1
	C. Valores Empíricos para la Planificación de Inventarios	V-3
	D. Ejemplo de un Diseño Sistemático	V-4

SECCION I INTRODUCCION

El objetivo principal de un inventario forestal es obtener información sobre ciertos parámetros forestales (N/ha, G/ha, V/ha) para fines de planificación y manejo forestal. El manejo intensivo en Europa requiere de datos detallados sobre volumen, incremento y superficies del bosque y también sobre sitios, infraestructura y ecología. En los países tropicales más que todo nos interesa el volumen aprovechable y su distribución por especies.

El manejo de rodales relativamente pequeños permite un levantamiento completo. En superficies boscosas muy grandes (concesiones, reservas forestales etc.) no se puede realizar un levantamiento completo, allí necesariamente hay que hacer un muestreo.

En Europa ya se realizaron evaluaciones oculares del bosque en los Siglos XV y XVI. En el Siglo XVIII se utilizaron muestras con cálculos de los parámetros forestales menos el cálculo de errores estadísticos. En el Siglo XIX en Escandinavia se aplicaron los métodos de evaluación por líneas.

El desarrollo de la fotografía aérea, la computación y la estadística matemática han favorecido bastante la aplicación del muestreo forestal. La estadística nos permite estimar la precisión de los promedios y totales y de la intensidad necesaria para una precisión requerida.

SECCION II

MUESTREO Y PARAMETROS ESTADISTICOS

Conocemos el principio del muestreo de las encuestas (ingreso promedio de los empleados públicos en EE.UU., porcentaje de analfabetismo de adultos en el altiplano, peso promedio de los estudiantes masculinos de la UAGRM).

En todos estos casos sacaríamos una muestra de una población estadística. La selección puede ser por azar o sistemática. Las poblaciones estadísticas en estos casos serían: los empleados públicos en EE.UU., los adultos en el altiplano y los estudiantes masculinos de la UAGRM respectivamente. La muestra correspondería a las personas seleccionadas.

Para comprender mejor los parámetros estadísticos partimos de un ejemplo forestal o sea del muestreo por azar de un rodal con 7 parcelas de 1 ha. Los elementos de la población serían todas las parcelas de 1 ha, que en su conjunto constituyen el bosque.

A. Media Aritmética

Supongamos que la muestra de 7 parcelas nos da los siguientes volúmenes por ha: 63, 75, 69, 70, 82, 76, 69 m³/ha.

Entonces podemos calcular la **media aritmética** \bar{x} de la muestra según la fórmula siguiente:

$$\bar{x} = \frac{Sx}{n} = \frac{63+75+69+70+82+76+69}{7} = \frac{504}{7} = 72 \text{ m}^3/\text{ha}$$

donde: x = valores de las unidades de muestreo

n = número de unidades de muestreo (tamaño de la muestra)

La media de la muestra es una estimación no viciada de la media poblacional.

Si suponemos una superficie total del bosque inventariado de 1000 ha, el **valor total** sería de $72 \times 1000 = 72000 \text{ m}^3$.

B. Valores de Dispersión

La **varianza** es una medida importante de la dispersión. La varianza de la muestra s^2 se obtiene según la fórmula:

$$s^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}{n-1}$$

s^2 es una estimación no viciada de la varianza poblacional. El denominador indica el número de los grados de libertad ($n-1$).

Para nuestro ejemplo calculamos:

$$s^2 = \frac{(63-72)^2 + (75-72)^2 + (69-72)^2 + (70-72)^2 + (82-72)^2 + (76-72)^2 + (69-72)^2}{6} =$$

$$= \frac{(-9)^2 + 3^2 + (-3)^2 + (-2)^2 + 10^2 + 4^2 + (-3)^2}{6} =$$

$$= \frac{81 + 9 + 9 + 4 + 100 + 16 + 9}{6} = \frac{228}{6} = 38$$

o según la segunda fórmula:

$$s^2 = \frac{63^2 + 75^2 + 69^2 + 70^2 + 82^2 + 76^2 + 69^2 - \frac{5045^2}{7}}{6} =$$

$$= \frac{3969 + 5625 + 4761 + 4900 + 6724 + 5776 + 4761 - 36288}{6} = \frac{228}{6} = 38$$

La **desviación standard** s de la muestra es la raíz de la varianza y para nuestro ejemplo sería:

$$s = \sqrt{38} = 6.16$$

El **coeficiente de variación** $s\%$ es la desviación standard en porcentajes de la media:

$$s\% = \frac{s * 100}{\bar{x}} = \frac{6.16 * 100}{72} = 8.56$$

C. Error standard

Lo que más nos interesa en un muestreo aparte de la media es su exactitud. Sabemos que cada media estimada en base a un muestreo tiene un error estadístico, el cual tenemos que calcular también.

Tenemos que recordar que todas las fórmulas estadísticas están basadas en el concepto de selección por azar. En nuestro ejemplo forestal ya hemos dicho que la población corresponde al conjunto de todas las parcelas de 1 ha que teóricamente componen el bosque.

Para sacar una muestra podríamos atribuir un número a cada parcela, poner estos números a una urna y sacar 7 números por azar. Si antes de sacar un nuevo número cada vez repondríamos el número anteriormente sacado entonces tendríamos una **muestra con reposición**.

Normalmente en el inventario no aplicamos el principio de reposición, porque no tendría sentido de inventariar la misma unidad de muestreo otra vez en caso de sacarla nuevamente. Nuestra muestra entonces es una **muestra sin reposición**. El **error standard S** en este caso es:

$$S = \frac{s}{\sqrt{n}} \sqrt{1 - \frac{n}{N}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \sqrt{1-i} \quad (\text{sin reposición})$$

donde:

s = estimación de la desviación standard poblacional

n = número de unidades de muestreo (tamaño de la muestra)

N = número de elementos de la población (tamaño de la población)

i = intensidad de muestreo

v = raíz cuadrada

Si la intensidad de muestreo es muy pequeña (<1%) como normalmente ocurre en nuestros inventarios la segunda parte de la fórmula $\sqrt{1-i}$ que también se llama el factor de corrección para poblaciones finitas prácticamente es 1. En este caso obtenemos la fórmula sencilla conocida:

$$S = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Es la fórmula para poblaciones infinitas o cuando se aplica el principio de reposición. Como hemos dicho en realidad no aplicamos el principio de reposición. Pero el tamaño de la muestra en comparación con el tamaño de la población normalmente es tan pequeño que se puede considerar la población como infinita.

$$\text{En nuestro ejemplo sería: } S = \frac{6.16}{\sqrt{7}} = 2.33$$

Si queremos el error standard en porcentajes de la media, lo que normalmente es el caso reemplazamos la desviación standard por el coeficiente de variación y obtenemos:

$$S\% = \frac{s\%}{\sqrt{n}}$$

$$\text{Para nuestro ejemplo calcularíamos: } S\% = \frac{8.56}{\sqrt{7}} = 3.24$$

D. Límites de Confianza y Error Admisible

Para poder definir límites de confianza todavía tenemos que multiplicar el error standard con el valor de t que depende del nivel requerido de confianza y de los grados de libertad.

Para 6 grados de libertad (nuestro ejemplo) y un nivel de confianza de 95% de la tabla de la distribución de t podemos sacar $t = 2.45$.

Los límites de confianza a ambos lados de la media entonces serían:

$$\bar{x} \pm tS = 72 \pm 2.45 \times 2.33 = 72 \pm 5.71$$

$$\text{Límite inferior: } 72 - 5.71 = 66.29$$

$$\text{Límite superior: } 72 + 5.71 = 77.71$$

En porcentajes resulta:

$$\bar{x} \pm tS\% = 72 \pm 2.45 \times 3.24\% = 72 \pm 7.93\%$$

Este valor aparece en nuestros listados de computación. Los valores tS y $tS\%$ también se llaman error admisible o error admisible en porcentajes respectivamente y se denominan E y $E\%$ lo que significa:

$$E = tS \quad \text{y} \quad E\% = tS\%$$

Nota: en los inventarios forestales normalmente se utiliza un nivel de confianza de 95%.

El error admisible es diferente para cada parámetro forestal (N/ha, G/ha, V/ha) y también difiere de especie a especie. Generalmente el error de una sola especie es muy alto. Eso nos indica que la distribución de una sola especie es muy heterogénea. Para un grupo de especies se reduce el error y más todavía si se trata del total de especies.

Si hablamos del error admisible del volumen por ha de una especie, de un grupo de especies o del total de especies nos referimos a tres diferentes poblaciones estadísticas. Normalmente nos interesa el volumen total, que queremos sacar con un error admisible # 10% y un nivel de confianza de 95%.

E. Interpretación de los Límites de Confianza

Según nuestros cálculos podemos decir que con una probabilidad de 95% el valor real de la población no es menor a 66.29 m³ y no es mayor a 77.71 m³. Eso significa: Si sacáramos una gran cantidad de muestras de 7 parcelas cada una, en un 95% de los casos las medias de las muestras caerían dentro de los límites de confianza. En el 5% de los casos caerían fuera de los límites. También se dice que la probabilidad de sobrepasar los límites es 5%.

Hay que tomar en cuenta que los 5% en este caso de dos límites (inferior y superior) están distribuidos a ambos lados de la distribución de t, o sea 2.5% a cada lado. En la tabla (ver anexo) el valor de t por eso corresponde al 2.5% (0.025) de probabilidad de sobrepasar los límites de confianza.

Si solamente nos interesa un lado, por ejemplo el límite inferior tendríamos que considerar solamente el lado izquierdo de la distribución de t, buscando el límite que corresponde al 5% de probabilidad de sobrepasar este límite. En este caso se habla de la **estimación mínima confiable**.

Ejemplo: Cuál es el volumen mínimo por ha, que podemos esperar con un 95% de probabilidad?

$$\bar{x} - tS = 72 - 1.94 \times 2.33 = 72 - 4.52 = 67.48$$

El valor de t ahora es 1.94 porque estamos considerando solamente un lado de la distribución de t con el 5% de probabilidad de sobrepasar este límite al lado izquierdo de la distribución de t.

F. Significado del Error Standard y Límites de Confianza

Si sacamos una muestra por azar (por ejemplo 7 parcelas) obtenemos una cierta media. Si teóricamente seguimos sacando muestras (cada vez 7 parcelas de una ha) realizando todas las combinaciones posibles (de 7 parcelas) dentro de la población entonces obtenemos la distribución de las medias de las muestras.

La media de esta distribución es igual a la media de la población y su desviación standard corresponde al error standard que hemos estimado anteriormente con sus límites de

confianza $\bar{x} \pm tS$.

Según los valores de t podemos elegir niveles de confianza de por ejemplo 90, 95 o 99%. Las probabilidades de sobrepasar los límites de confianza en estos casos serían 10, 5 y 1%. Estas se distribuyen a ambos lados de la distribución, si nos interesan los límites a ambos lados de la media o a un lado si solamente nos interesa un límite como en el caso de la estimación mínima confiable.

G. Estimación del Tamaño de la Muestra

Antes de un inventario normalmente queremos saber cuántas unidades de muestreo serían necesarios para alcanzar un cierto error admisible (10%) con cierto nivel de confianza (95%). Con las anteriores fórmulas del error standard y error admisible podemos escribir:

$$E\% = t \frac{s\%}{\sqrt{n}}$$

y de ahí en número requerido de unidades de muestreo es:

$$n = \frac{t^2 s\%^2}{E\%^2}$$

donde:

t = valor que define el nivel de confianza

s% = estimación del coeficiente de variación de la población

E% = Error admisible

Anteriormente habíamos calculado el coeficiente de variación con 8.56% y un error admisible de 7.93%. Si queremos alcanzar un error admisible de 5% a un nivel de confianza de 95% (t.2) calcularíamos:

$$n = \frac{4 \times 8.56^2}{5^2} = \frac{4 \times 73.27}{25} = 11.72$$

Con 12 parcelas podríamos alcanzar nuestra meta. Para un nivel de 95% normalmente se asume un valor de $t=2$, lo que corresponde a la distribución normal que para muestras más grandes ($n>30$) se aproxima bastante bien.

El problema normalmente es, que de antemano no conocemos el valor del coeficiente de variación $s\%$. Este valor depende de la homogeneidad del bosque y del tamaño de las unidades de muestreo. Unidades más pequeñas normalmente corresponden a un mayor coeficiente de variación. La heterogeneidad del bosque y con ésta el coeficiente de variación normalmente también aumentan con el tamaño del bosque.

La estimación del coeficiente de variación puede basarse en valores de experiencia en bosques semejantes anteriormente inventariados o se podría realizar un muestreo preliminar de poca intensidad para su estimación.

SECCION III

FORMA Y TAMAÑO DE LAS UNIDADES DE MUESTREO

A. Parcelas Fijas

En nuestros ejemplos hasta ahora siempre hemos partido de parcelas fijas de 1 ha. Estas parcelas normalmente son de 10 x 1000 o 20 x 500 m. Pero según circunstancias el tamaño de las parcelas también puede ser definido diferentemente (por ejemplo 0.5, 0.25, 0.2 o 0.1 ha). Importante es, que el tamaño de las parcelas no debe variar en el mismo inventario.

En vez de parcelas rectángulos teóricamente también se podrían aplicar cuadrados o círculos, pero no convienen en el bosque tropical por la mala visibilidad y la dificultad de definir sus perímetros.

La unidad de muestreo también podría ser compuesta de varios elementos, por ejemplo 4 parcelas de media ha en forma de una estrella. En este caso se habla de conglomerados. Entre sí los conglomerados deben ser idénticos en cuanto a forma, diseño y tamaño.

Hay que tener presente que los tamaños de las unidades de muestreo siempre se refieren al plano horizontal. En terrenos inclinados hay que hacer la corrección de pendiente de forma que la proyección horizontal de la unidad otra vez corresponde al tamaño originalmente definido.

Una parcela definida con un 1 km de largo, que sube en una pendiente debe ser más largo para que su proyección horizontal tenga el largo de 1 km exactamente.

B. Muestreo Goniométrico

Un método muy sencillo, práctico y eficiente es el muestreo goniométrico de Bitterlich. Utilizando el relascopio, incluso la corrección de pendiente se realiza en forma automática.

En terrenos planos se puede utilizar también una placa de 2 cm de apertura, fijada en una pita de 50 cm, lo que corresponde a una factor basimétrico de 4. Al factor basimétrico de 1 correspondería una apertura de 1 cm.

La aplicación de este instrumento es muy fácil. Se da una vuelta de 360° tomando en cuenta todos los árboles que en la altura del pecho aparezcan más gruesas que la apertura. El número de árboles contados en el caso del factor 1 nos da directamente el área basal.

Como se ve este método está basado en un ángulo fijo de medición, que en el caso de la placa está definido por su apertura y el largo de la pita.

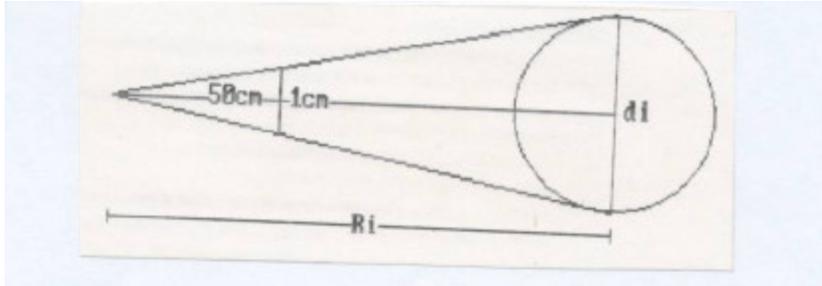


Fig 1. Método goniométrico de Bitterlich

Partiendo del factor basimétrico de 1 y cierto diámetro a la altura del pecho d_i (ver Fig. 1), el círculo límite está definido por la siguiente relación:

$$1/50 = d_i/R_i$$

Su radio es de:

$$R_i = 50 d_i \text{ (cm)} = 50 d_i/100 \text{ (m)}$$

correspondiente a un área de:

$$A_i = p R_i^2 = p (50 d_i)^2/10000 \text{ (m}^2\text{)}$$

El área basal que corresponde a todos los árboles con el diámetro d_i es de:

$$z_i p d_i^{5/4} \text{ (cm}^5\text{)}$$

y el área basal por ha:

$$G_i/\text{ha} = \frac{z_i p d_i^{5/4}}{p (50 d_i)^2/10000} = z_i$$

Lo que se ha derivado para el diámetro d_i también vale para cualquier otro diámetro así que:

$$G/\text{ha} = S G_i = S z_i = z$$

En el caso general de una apertura de b (cm) y una distancia ocular de l (cm), el radio del círculo límite que corresponde al diámetro d_i (cm) sería:

$$R_i = l d_i / b \text{ (cm)} = l d_i / (100 b) \text{ (m)}$$

y el área basal por ha:

$$G_i / \text{ha} = \frac{z_i \pi d_i^2 / 4}{\pi l^2 d_i^2 / (10000 b^2)} = 2500 b^2 / l^2 z_i$$

Para el total obtenemos:

$$G / \text{ha} = \sum G_i = 2500 b^2 / l^2 \sum z_i = 2500 b^2 / l^2 z$$

La fórmula muestra que el factor basimétrico es de $2500 b^2 / l^2$. Con eso se comprueba que una distancia ocular de 50 cm y una apertura de 2 cm corresponde a un factor 4 y una apertura de 1 cm a un factor de 1.

Normalmente utilizamos un factor de 4 para reducir el tamaño de la unidad de muestreo, contrarrestando así la mala visibilidad en el bosque tropical.

En la práctica a veces es difícil de determinar ocularmente si un árbol entra o no a la unidad de muestreo. En estos casos debemos calcular el radio límite del árbol. Para el factor basimétrico de 4 ($l=50\text{cm}$, $b=2\text{cm}$) obtenemos:

$$R_i = l d_i / (100 b) = 50 d_i / (100 \cdot 2) = d_i / 4$$

Un árbol de 40 cm de DAP tendría un radio límite de $40/4 = 10\text{m}$. Si el árbol se encuentra a una distancia mayor de 10m, ya no debe tomarse en cuenta.

En casos de duda hay que medir el diámetro del árbol para poder decidir si éste debe ser contado o no. Normalmente no sería necesario medir el DAP, en el caso que solamente se quiere estimar el área basal.

Pero generalmente aparte del área basal queremos conocer también el número y volumen de los árboles por ha y su distribución por clases diamétricas. Así la medición del DAP es imprescindible.

Para calcular el número de árboles por ha tenemos que recordar que cada árbol contado corresponde a un área basal por ha dado por el factor basimétrico (k). Si éste es de 4, cada árbol contado corresponde a $4 \text{ m}^2/\text{ha}$.

Ya que la sección transversal del árbol contado con un DAP de d_i (m) es $d_i^2\pi/4$, el número de árboles por ha que corresponde a este árbol es de $k/(d_i^2\pi/4)$ y para todos los árboles contados:

$$N/ha = \frac{4k}{\pi} S \frac{1}{d_i^2}$$

Para el cálculo del volumen por ha nuevamente partimos de un árbol contado correspondiente a un área basal de k (m^2/ha). Multiplicando por la altura comercial (h_i) y el factor de forma (f_i) obtenemos el volumen por ha correspondiente a este árbol: $V_i/ha = k f_i h_i$

De ahí se deriva el volumen total:

$$V/ha = k S f_i h_i$$

Si la ubicación de los árboles está basada en un solo factor de forma (f), se puede simplificar esta fórmula en:

$$V/ha = k f S h_i$$

La aplicación eficiente del muestreo goniométrico de Bitterlich requiere de conglomerados para tener unidades de muestreo suficientemente grandes. La distancia entre las unidades goniométricas por lo menos debe ser 50 m para evitar la inclusión de los mismos árboles en dos unidades vecinas.

SECCION IV
METODOS DE MUESTREO

En el cuadro 1 se enumeran los métodos más importantes, que en diferentes partes del mundo han sido aplicados en inventarios forestales.

Cuadro 1. Métodos de muestreo para inventarios forestales
Muestreo por azar
Muestreo por azar simple
Muestreo con restricción del principio de azar (Bloques)
Muestreo a varios niveles (Multi-stage sampling)
Muestreo estratificado
Muestreo con probabilidades distintas de selección (Muestreo por listas)
Muestreo sistemático

A. Muestreo por Azar Simple y otros Métodos de Muestreo

Hasta el momento solo hemos hablado del muestreo por azar simple, que es la base de todos los métodos de muestreo. Por eso el conocimiento de sus fórmulas es de gran importancia. Aparte de este método solo el muestreo estratificado y el sistemático es de mayor interés en este contexto. De los otros métodos solamente nos interesan los conceptos básicos.

El objetivo de todos los métodos más complejos es mejorar la eficiencia del muestreo mediante diseños apropiados y/o informaciones adicionales. Las últimas muchas veces no existen o no son disponibles lo que reduce la aplicabilidad de estos métodos.

B. Muestreo por Bloques

En el muestreo por bloques el bosque está dividido en bloques de igual tamaño (por ejemplo 20) y de cada bloque se saca la misma cantidad de unidades de muestreo por azar (por ejemplo 5).

La restricción del principio por azar es que cada bloque debe tener la misma cantidad de unidades de muestreo lo que significa que la totalidad de unidades (100) no está distribuido completamente al azar.

C. Muestreo a Varios Niveles (Multi-Stage Sampling)

Este método corresponde al muestreo por bloques. La diferencia es que en este caso no todos los bloques están levantados. En el primer nivel de muestreo algunos están seleccionados por azar (unidades primarias). En el segundo nivel se distribuye por azar las unidades secundarias dentro de los bloques elegidos en el primer nivel (submuestreo).

D. Muestreo con Probabilidades Distintas de Selección

En los métodos anteriores cada elemento de la población tiene la misma probabilidad de ser elegido. Si ya existen muchas informaciones sobre el bosque como en los países europeos el muestreo por listas puede ser un método eficiente.

Si la población está formada por varios rodales y ya existen informaciones, por ejemplo la superficie de los rodales, entonces la selección de los rodales puede ser con una probabilidad proporcional a la superficie de los mismos.

Los elementos de muestreo en este caso son los rodales cuyos parámetros forestales deben ser levantados. Ya que se utiliza una lista para la selección, este método también se llama muestreo por listas.

E. Muestreo Estratificado

La estratificación es una zonificación del bosque con el objetivo de conseguir estratos más homogéneos, por ejemplo tres estratos de bajo, mediano y alto volumen por ha. La estratificación es eficiente si la variación dentro de los estratos es pequeña y entre los estratos grande.

En la práctica la estratificación generalmente se realiza en base a una fotointerpretación estereoscópica, considerando la densidad del bosque, la altura de los árboles y el drenaje. Si hay asentamientos humanos es aconsejable de usar imágenes recientes de satélite para determinar las áreas afectadas. El resultado de la interpretación es un mapa forestal con los diferentes estratos forestales y no forestales. Los primeros también se llaman tipos de bosque.

El número de unidades de muestreo en los estratos forestales puede ser proporcional a la superficie de los mismos. La intensidad de muestreo en este caso es igual en cada estrato. Si algunos estratos forestales son de menos interés forestal se puede reducir la intensidad de muestreo en estos estratos.

Para calcular la media del muestreo estratificado hay que ponderar las medias individuales de cada estrato con su superficie, multiplicándolas con el factor P_i , el cociente de cada superficie individual y la superficie total:

$$\bar{x} = \sum P_i \bar{x}_i$$

Para calcular el error standard del muestreo estratificado hay que ponderar los errores standard individuales con el factor P_i correspondiente a cada estrato:

$$S_{\text{estr}} = \sum P_i S_i$$

Teóricamente se puede calcular una intensidad de muestreo óptima para cada estrato. Esto permite minimizar el error admisible o el costo del inventario. En la práctica estos métodos son de poco interés por falta de la información necesaria.

F. Muestreo Sistemático

El muestreo sistemático es el método que más nos interesa porque es el método que normalmente aplicamos en el muestreo forestal. La distribución por azar en la práctica es difícil a realizar por la dificultad de ubicar en el campo los sitios de cada unidad de muestreo. Además el costo por los trechos a caminar sería alto.

El muestreo sistemático al contrario es muy simple. El diseño correspondiente es una distribución regular (cuadrícula) con distancias iguales entre las unidades de muestreo.

Para evitar sesgos (bias) en el diseño sistemático hay que tener cuidado que la red del muestreo no sea paralelo a ciertos rasgos sistemáticos del terreno por ejemplo a un río o una cadena de colinas.

Otra desventaja teórica del muestreo sistemático es que no hay fórmulas exactas para el error admisible. Las fórmulas existentes son aproximatorias y además complicadas.

Por esta razón normalmente se calcula el error admisible con la fórmula del muestreo por azar. El valor así calculado sobreestima el valor real del muestreo sistemático. Pero eso también puede considerarse como cierta ventaja porque implica un cierto margen de seguridad.

SECCION V

DISEÑO DE UN MUESTREO SISTEMATICO

El muestreo forestal por lo expuesto normalmente utiliza el diseño sistemático. Las unidades de muestreo están distribuidas en forma de cuadrícula con distancias iguales entre los puntos centrales de las unidades.

Para diseñar un muestreo la primera pregunta es cuántas unidades de muestreo y de que tamaño necesitamos para alcanzar un cierto error admisible. Generalmente tenemos en mente un error admisible de 10% a un nivel de confianza de 95%, refiriéndonos al volumen total por ha.

A. Problema de Optimización

La pregunta sobre la cantidad de unidades de muestreo nos lleva a la pregunta del número y tamaño óptimo de las unidades de muestreo para el parámetro forestal considerado (volumen total por ha). La solución de este problema depende de factores estadísticos y económicos.

Para discutir el problema, nuestra pregunta debe ser más específica aún: Cuántas unidades y qué tamaño de unidades necesitamos para alcanzar cierto error admisible del volumen total (a cierto nivel de confianza) con un mínimo de costos o cómo minimizamos el error admisible con un cierto monto de dinero disponible.

Para contestar estas preguntas necesitaríamos una función de costos y una función del coeficiente de variación. Las variables independientes en ambos casos serían el tamaño y número de las unidades de muestreo.

B. Consideraciones para una Solución Pragmática

Como en la práctica no conocemos estas funciones no podemos solucionar el problema de optimización. Pero sí tenemos que ser conscientes de las relaciones estadísticas y económicas en general para poder diseñar un muestreo racional y eficiente.

El tamaño óptimo de la unidad de muestreo como ya hemos dicho depende de factores estadísticos y económicos. En el sentido estadístico, es mejor tener muchas unidades pequeñas que pocas grandes. Si por ejemplo la superficie muestreada sería 25 ha en total, estadísticamente es mejor distribuir 100 unidades de 0.25 ha que 25 unidades de 1 ha.

Eso se puede explicar con la fórmula del error admisible. Si aumentamos el número de unidades (n) el error se reduce con la raíz de n . Si al mismo tiempo reducimos el tamaño de las unidades aumenta el coeficiente de variación, pero manteniendo la misma intensidad de muestreo la reducción obtenido por el denominador ($\%n$) es más fuerte que este otro efecto.

Por los costos del inventario no podemos reducir demasiado el tamaño de las unidades porque en este caso las distancias inefectivas para llegar de una unidad de muestreo a la otra se aumentan considerablemente. Para un muestreo sistemático la distancia (d) entre las unidades es:

$$d = \sqrt{\frac{vA}{n}}$$

donde A = Superficie de la población
n = número de unidades de muestreo

El trayecto total a caminar sería $d \cdot n = \sqrt{An}$. Como vemos aumenta con la raíz de n. Con el trayecto recorrido también aumenta el tiempo y el costo total del trabajo, especialmente si el área inventariada no cuenta con mucha infraestructura como mayormente ocurre en los bosques tropicales.

Para equilibrar los dos efectos de la \sqrt{n} , que por un lado reduce el error admisible y por otro lado aumenta el costo hay que buscar un compromiso pragmático.

En áreas muy grandes muchas veces se aplica el muestreo por conglomerados. La unidad de muestreo en este caso es el conglomerado, por ejemplo 4 parcelas distribuídas en forma de una estrella alrededor de un punto central.

C. Valores Empíricos para la Planificación de Inventarios de Reconocimiento

Cuadro 2. Intensidades mínimas y otros parámetros de muestreo en función de la superficie poblacional				
Superficie total de los estratos forestales (ha)	Intensidad mínima (%)	Superficie muestreada (ha)	Tamaño de las unidades de muestreo en el caso de parcelas fijas (ha)	No de parcelas variables por conglomerado en el caso del muestreo goniométrico (FB=4)
100	8.0	8	0.08	1
500	2.0	10	0.1	1
1.000	1.5	15	0.15	2
2.000	1.2	25	0.25	3
5.000	0.8	40	0.4	4
10.000	0.5	50	0.5	5
15.000	0.35	50	0.5	5
20.000	0.28	55	0.55	6
25.000	0.24	60	0.6	6
30.000	0.22	65	0.65	7
50.000	0.2	100	1.0	10
100.000	0.15	150	1.5	15
200.000	0.1	200	2.0	20

Todas las consideraciones mencionadas, de carácter económico, estadístico y práctico se reflejan en el Cuadro 2, que puede servir como guía para el diseño de un inventario de reconocimiento. Las mismas sugerencias forman parte de un manual de instrucciones para inventarios forestales de reconocimiento, recientemente propuesto al CDF (ver apéndice).

El Cuadro 2 se basa en 100 unidades de muestreo y una intensidad de muestreo, que está en función del tamaño de la población.

De la experiencia sabemos que en áreas de unos 50.000 ha la distribución de 100 parcelas de 1 ha es un diseño de probada eficacia en la práctica. En este caso tenemos 100 ha muestreadas y un 0.2% de intensidad de muestreo.

En poblaciones más pequeños por ejemplo de 10.000 ha podemos reducir la superficie muestreada porque la heterogeneidad (coeficiente de variación) se reduce con el tamaño de la población.

Una superficie muestreada de 50 ha sería un valor razonable en este caso, lo que significa una intensidad de 0.5%. La intensidad de muestreo en este caso ha aumentado. La razón es, que no podemos reducir la superficie muestreada proporcionalmente a la superficie de la población.

Sabemos que el error admisible se reduce con la raíz de n y que este efecto sobrepasa al efecto de la reducción de heterogeneidad de poblaciones más pequeñas. Por eso no se puede mantener la intensidad de 0.2% correspondiente a 20 ha muestreadas en el caso de 10.000 ha.

Optamos por 50 ha muestreadas o sea 0.5% de intensidad en este caso. Por lo general podemos decir que la intensidad de muestreo debe aumentar en forma progresiva si se reduce la superficie de la población (ver Cuadro 2).

Otro aspecto importante es el tamaño de la unidad de muestreo. Sabemos que en el sentido estadístico es mejor contar con muchas unidades pequeñas que con pocas grandes. Por eso en el caso de 10.000 ha es mejor de reducir las parcelas a 0.5 ha, manteniendo 100 unidades de muestreo en vez de trabajar con 50 parcelas de 1 ha.

En la práctica se ha visto que 100 unidades de muestreo son un buen compromiso en cuanto a los aspectos estadísticos y económicos y hasta en áreas muy grandes de 100.000 a 200.000 ha en el sentido económico todavía son factibles.

Por eso en el manual anteriormente mencionado se recomienda siempre utilizar 100 unidades de muestreo y variar el tamaño de la unidad de muestreo en función del tamaño de la población.

En poblaciones muy grandes de 100.000 o 200.000 ha se recomienda utilizar conglomerados compuestos de 3 o 4 parcelas de 0.5 ha respectivamente, las cuales pueden ser distribuidas en forma de una estrella alrededor de un punto central.

En el caso del muestreo goniométrico según Bitterlich se ha fijado un tamaño promedio de 0.1 ha por parcela variable para un factor basimétrico de 4, que es el factor a utilizarse en bosques tropicales. El tamaño de la unidad de muestreo en este caso varía con el número de parcelas variables a levantarse por conglomerado.

D. Ejemplo de un Diseño Sistemático

La superficie de los estratos forestales en este ejemplo aproximadamente cubre 50.000 ha. Según nuestra experiencia el muestreo en este caso puede basarse en 100 parcelas de 1 ha (ver cuadro 2).

Hay 4 estratos, que son de mayor interés forestal con una superficie aproximada de 38.000 ha y 2 estratos de menor interés que han sido inventariados con muy baja intensidad de muestreo correspondiente a solamente 8 parcelas. Los 4 estratos mencionados por otro lado cuentan con 92 parcelas sistemáticamente distribuidas.

La próxima pregunta sería a que distancia tenemos que repartir las parcelas. Del número de las parcelas y de la superficie de los estratos de interés podemos calcular la distancia entre las unidades:

$$d = \frac{380}{92} = 4.13 \text{ km}$$

La distancia entre las unidades de muestreo y también entre las líneas de levantamiento (picadas) sería 2 km. El trecho total a caminar o el largo total de las picadas para los 4 estratos de interés entonces sería $2 \times 92 = 184 \text{ km}$.

Para ahorrar costos se puede aumentar la distancia entre las picadas con un factor entre 1 y 1.5 y reducir la distancia entre las unidades a lo largo de las picadas con el mismo factor. No se debe utilizar factores mayores a 1.5 para no desviarse demasiado del sistema sistemático puro.

En este caso podríamos aumentar la distancia entre las picadas a 3 km multiplicando con el factor 1.5 y reducir la distancia entre las parcelas a lo largo de las picadas con el mismo factor ($2/1.5 = 1.33 \text{ km}$).

Con este procedimiento reducimos el largo total de las picadas a un valor bien razonable de 122 km y al mismo tiempo utilizamos mejor las picadas reduciendo los trayectos sin inventariar.

Como demuestra el diseño del muestreo el patrón para la distancia entre las parcelas sobre las picadas no es de 1.33 km, más bien se ha reducido a 1 km de distancia.

La razón es, que a veces conviene aumentar la distancia entre dos parcelas vecinas sobre una línea de levantamiento para no acercarse demasiado al límite del estrato colindante, o para no pasar este límite. Lo mismo pasa en el caso de obstáculos.

De esta manera se aumenta la distancia promedio entre las parcelas sobre las líneas de levantamiento a un valor mayor a 1km, acercándose al valor calculado de 1.33 km.

Como se puede ver, el valor calculado solamente es una ayuda para el diseño del muestreo, que en su versión final es el resultado de un procedimiento empírico.

A continuación se describen brevemente los pasos necesarios para llegar al diseño final:

- C Confección del mapa forestal en base a una fotointerpretación y otras fuentes.
- C Calcular superficies de los estratos.
- C Definir el tamaño de las parcelas en base al número de unidades (normalmente cien) y la intensidad de muestreo (ver Cuadro 2).

- C Definir las distancias entre picadas y entre los puntos céntricos de 2 parcelas vecinas sobre una picada.
- C Dibujar las líneas de levantamiento (normalmente en dirección Este-Oeste) a la distancia definida.
- C Distribuir las unidades de muestreo sobre las líneas de levantamiento con la distancia definida.

Para la distribución de las unidades es conveniente dibujar una línea de referencia vertical y distribuirlas en forma de una red cuadrangular. Si hay que recorrer una unidad (para evitar que caiga en dos estratos o para aumentar su distancia a un límite de estrato) solamente se recorre esta unidad, manteniendo la red cuadrangular en general.

Como hemos dicho la distancia entre las picadas es de 3 km. Sobre las picadas la distancia entre los puntos centrales de cada parcela es de 1 km. Si partimos de parcelas de 500 m x 20 m, la distancia entre el final de una parcela y el comienzo de la próxima sería 500 m. Sobre la picada se inventariará 500 m, dejando otros 500 m sin inventariar etc.

El trecho no inventariado en el caso normal no debe ser más corto que el trecho inventariado como una regla práctica del diseño. En nuestro caso estamos cumpliendo esta regla y la distribución de las parcelas con las distancias indicadas nos lleva al diseño final.