

Evaluación del método de muestreo de parcelas de áreas fijas circulares en presencia de correlación espacial

Evaluation of fixed circular areas plot sampling method in presence of spatial correlation

LUIS RIVAS¹,
MARIANO DURAN²
y ARGENIS MORA³

1 Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Sistemas, Departamento de Investigación de Operaciones.

2 Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Departamento de Manejo de Bosques, correo electrónico: duranca04@yahoo.es.

3 Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Grupo de Investigación Manejo Múltiple de Ecosistemas Forestales, Instituto de Investigaciones para el Desarrollo Forestal, correo electrónico: amora@ula.ve

Recibido: 28-01-11 / Aceptado: 25-06-11

Resumen

En el presente estudio se evalúa el muestreo de parcelas circulares de área fija, con la incorporación de la correlación espacial, y así determinar el alcance de dicho método, que forma parte de la Geoestadística. La metodología inicia con el estudio de la estructura espacial de las variables Volumen, Altura y Área Basal; para obtener la información necesaria y diseñar diversos programas de simulación haciendo uso de software libre R. La evaluación del método antes descrito arrojó resultados satisfactorios al aplicarlo tomando en cuenta la información aportada por el estudio geoestadístico, obteniendo valores mínimos de los estimadores estudiados, usando la distancia de separación entre parcelas aportada por el semivariograma, y ventajas como la reducción de toma de muestras y la disminución de tiempo de aplicación del mismo. El muestreo de Parcelas Circulares de Área Fija (PCAF) se utiliza para la estimación de diferentes parámetros cuantitativos de interés forestal, como Volumen Total (V), Área Basal Total (AB) y Número de Árboles Totales (N) en la población; en especial la estimación de la producción de madera para su transformación en pulpa para papel y derivados.

Palabras clave: simulación, Geoestadística, Parcelas Fijas, Programa R, Muestreo Forestal, Correlación Espacial.

Abstract

In the present study, circular fixed area plots sampling method is evaluated, with the incorporation of the spatial correlation, in order to determine the effects of this technique, which is a Geostatistics branch. The methodology starts studying spatial structure of the different variables measured in trees, to obtain the data necessary to design diverse simulation programs using R free software. The evaluation of the method described above, produced satisfactory results when taking into account the information provided by the geostatistics study; obtaining minimum values of the estimators studied using the separation distance between plot obtained from the semivariogram, and advantages as the reduction of: a) number of samples and b) sampling time. The sampling of circular fixed area plots is used for the estimation of different quantitative parameters from forest plantations, such as Volume Total (V), Total Basal Area (AB) and Number of Total Trees (N); especially for wood production estimation and its pulp transformation for paper and derivatives.

Key words: simulation, Geostatistics, fixed circular area plots, R Program, forestry sampling, spatial correlation.

1. Introducción

La aplicación de diversas técnicas de muestreos en trabajos de investigación que involucran grandes cantidades de datos se ha convertido en una herramienta de gran apoyo para los investigadores, debido a que en muchos casos resulta poco práctico y a veces imposible realizar dichos estudios a la cantidad total de los datos (censo), es por ello que

el muestreo como técnica de selección de muestras juega un papel indispensable ya que por medio de él, se pueden obtener características propias de toda la población en base a un número reducido de datos tomados como muestra (Cochran, 1997). Empresas comerciales como parte de su programa de investigación, dentro del plan de manejo aplican diversos métodos de muestreos. Es por ello que el desarrollo de esta investigación está enfocado a

evaluar el muestreo de parcelas circulares de área fija sistemático con arranque aleatorio, introduciendo la información obtenida a través del análisis geoestadístico que involucra el estudio de la correlación espacial existente entre las observaciones, verificando el supuesto de independencia entre las mismas.

Esta evaluación se realiza utilizando la simulación como técnica de análisis basada en la experimentación sobre un fenómeno del sistema real, la cual permite estudiar los cambios del sistema al hacer alteraciones en los diseños que lo simulan y poder observar los efectos que estas alteraciones generan en el comportamiento del mismo. En el desarrollo de la metodología se diseñaron diferentes programas que permiten la simulación de los métodos de selección de muestras bajo diversas condiciones iniciales, así como el cálculo de los diferentes criterios estadísticos utilizados para evaluar el comportamiento de los estimadores poblacionales estudiados. Se puede señalar que las investigaciones realizadas a las diferentes plantaciones juega un papel muy importante, pues de esto dependerá el máximo aprovechamiento de los recursos y la mejora de los beneficios que desean las empresas.

El presente trabajo propone el estudio y análisis de una plantación de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*), con una edad de 7 años, propiedad de la empresa comercial (Smurfit Kappa Cartón de Venezuela) haciendo uso de la técnica del muestreo de parcelas circulares de área fija (PCAF) (Quintero y Durán, 2008; Schreuder *et al.*, 1993), en donde se incorpora toda la información obtenida a través de la inclusión de la Geoestadística y la teoría de variables regionalizadas (Alfaro, 2005), usándolas por medio de diferentes escenarios de simulación.

De forma general en la naturaleza se encuentran variables biológicas, físicas y ecológicas las cuales muestran alguna heterogeneidad, así como una continuidad espacial en diversas localizaciones. Aunque se pueden encontrar estudios relacionados sobre las variaciones temporales de diversas variables en poblaciones, hasta fechas muy recientes es poco común encontrar información sobre el análisis de las distribuciones de variables en el espacio, por la dificultad que existía entre el manejo y análisis de los datos (software y hardware).

En algunos casos cuando se intentó analizar la variación espacial de las poblaciones mediante el

uso de índices de dispersión, se encontró que era imposible la distinción de las distintas distribuciones espaciales con esos métodos, ya que ignoran la localización de las muestras (Taylor, 1984, citado por Moral, 2004). Del mismo modo al desarrollar estudios relacionados con inventarios forestales y el análisis de los parámetros utilizando el muestreo probabilístico como criterio de selección de muestras, surgen varias interrogantes como: ¿Cuál debería ser el tamaño de las parcelas a utilizar para la selección de muestras?, ¿Cuál debe ser el número de parcelas recomendado a ser seleccionado como muestra representativa del área forestal a evaluar? y en el caso de combinar el muestreo sistemático con el muestreo de parcelas circulares de área fija, ¿Cuál es el h (distanciamiento entre parcelas) óptimo?

Algunas investigaciones han dado respuestas a dichas interrogantes pero en ninguna de ellas, se considera la información que puede aportar la Geoestadística a través del estudio y diseño de los semivariogramas como instrumento para definir ciertos valores óptimos que son utilizados en los estudios de estimación de los diferentes parámetros poblacionales, con los cuales se proporciona información acerca de la correlación espacial que existe entre las diferentes variables en una determinada población. La carencia de estudios que relacionen la información de los distintos métodos de muestreos con la distancia de separación que debe existir entre las parcelas contiguas que componen la muestra, impulsa el desarrollo de esta investigación.

Para efectos de la presente investigación se considerará el muestreo de parcelas circulares de área fija sistemático con arranque aleatorio (PCAF-SAA) y el muestreo de parcela circular de área fija-completamente aleatorizado (PCAF-CA); este último se utiliza con el fin validar los algoritmos utilizados. El objetivo principal, utilizando estos tipos de muestreo es el de estimar diferentes parámetros poblacionales de interés como el volumen total (VT), área basal total (AB) y número de árboles total (N); dentro de una plantación a campo abierto. Como ejemplo de la aplicación de este método se encuentra la Empresa Comercial Smurfit Kappa Cartón de Venezuela que “es un grupo manufacturero dedicado a satisfacer las necesidades de empaque en el mercado nacional e internacional, quienes iniciaron actividades en Ve-

nezuela desde el año 1954. Sus operaciones están totalmente integradas, con actividades productivas que comprenden, la plantación y manejo de plantaciones forestales, reciclaje de fibras secundarias, fabricación y venta de papel, cartulinas, cartón y empaques” (Smurfit Cartón de Venezuela, 2007). Este tipo de empresa está relacionada al estudio de áreas forestales, estableciendo diversas plantaciones con fines comerciales, donde realizan estudios aplicando estrategias de muestreo confiables que permitan determinar con mayor precisión y exactitud los parámetros de interés.

2. Materiales y métodos

La presente investigación se realiza en función de los datos proporcionados por parte de la empresa comercial Smurfit Kappa Cartón de Venezuela, correspondiente a una plantación de árboles de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*) destinada a la producción de pulpa y papel; cuya forma es aproximadamente rectangular, con dimensiones por el eje de las abscisas de 0 metros como valor mínimo y 330 metros como valor máximo, por el eje de las ordenadas como valor mínimo 0 metros y como valor máximo 148 metros. Se realizó un censo en 4,8 ha., midiéndose un total 4.657 datos (árboles), correspondiente a un 86,62% de sobrevivencia en la población.

Los datos corresponden a la información de árboles con una edad entre 7 años, plantados a un distanciamiento de 3 m x 3 m. entre hileras y entre plantas. Dichos datos están organizados en cinco columnas de la siguiente manera, en la primera columna se encuentra la coordenada de ubicación en el eje X, en la segunda columna se encuentra la coordenada de ubicación en el eje Y, en la tercera columna se encuentra la variable dasométrica correspondiente al diámetro a la altura de pecho (dap) en cm, definiéndose como la medida que se realiza al fuste de los árboles a una altura de 1,3 m sobre el nivel del suelo. En la cuarta columna se encuentra la variable altura (h) en m. la cual es la distancia medida sobre el eje del árbol que existe entre el pie del árbol a nivel del suelo y su ápice (yema terminal del tallo), entendiéndose por ápice del árbol la parte más alta de la copa en prolongación del eje del tronco. Por último en la quinta columna se en-

cuentra la variable volumen (V) en m³. Para la toma de las muestras y estimar los parámetros poblacionales se usaron parcelas de radio 8,92 m (Figura 1). Se diseñan programas que simulan el PCAF-SAA, a distintos distanciamientos y el distanciamiento obtenido incorporando los elementos de la geostatística. También se realizan simulaciones mediante la aplicación del PCAF-CA, para verificar el cumplimiento de los supuestos del muestreo completamente aleatorizado y para verificar los algoritmos y programa de simulación.

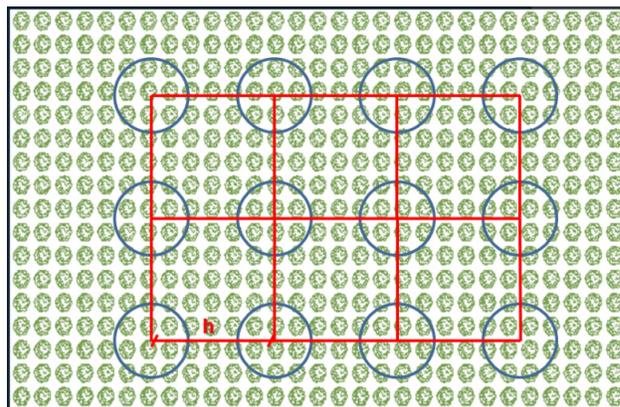


Figura 1. Esquema para el muestreo de parcela circular de área fija-sistemático con arranque aleatorio (PCAF-SAA).

La estimación de las variables volumen total (V), área basal total (AB) y número de árboles total (N), se hace por medio de la aplicación del teorema de Horvitz-Thompson (HT), (Overton y Stehman, 1995), a través de la ecuación 1:

$$\hat{Y}_{HT} = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

y_i = medición para la i -ésima unidad para cada variable estudiada.

π = probabilidad de inclusión de una unidad en la muestra; es constante.

Se utilizan tres indicadores para evaluar los resultados obtenidos por los diferentes tipos de muestreos diseñados. Estos se definen a continuación: 1) el sesgo, el cual es la diferencia entre el valor esperado del estimador y el parámetro que se estima. El sesgo de un estimador se expresa como:

$$\text{sesgo} = \left| E(\hat{\theta}) - \theta \right| \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$E(\hat{\theta})$ = Esperanza del estimador

$\hat{\theta}$ = Parámetro

Si el sesgo toma un valor 0 (cero), o cercano a cero, se dice que el estimador es insesgado. Un estimador que es insesgado tiene una alta probabilidad de tomar un valor cercano al valor del parámetro, 2) la varianza, que es un estimador de la dispersión de una variable aleatoria de su valor esperado, $E(\hat{\theta})$; definida como:

$$Var(\hat{\theta}) = E[\hat{\theta} - E(\hat{\theta})]^2 \quad (Ec.3)$$

Por último, se tiene el error cuadrático medio de un estimador $\hat{\theta}_{(ECM)}$, donde:

$$ECM(\hat{\theta}) = Var(\hat{\theta}) + Sesgo(\hat{\theta})^2 \quad (Ec.4)$$

Con los datos georeferenciados, se construyó el semivariograma. En la figura 2, se puede observar la forma típica de un semivariograma.

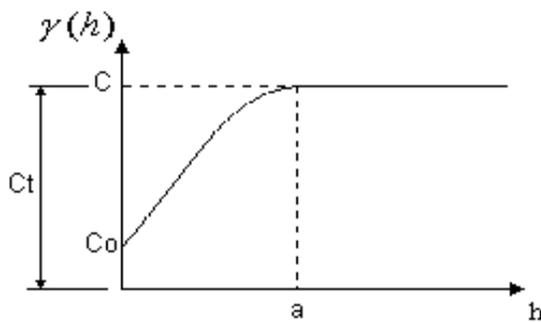


Figura 2. Forma típica de un semivariograma.

La función $\gamma(h)$ se denomina semivariograma, la cual puede ser obtenida por la ecuación 5:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2Np(h)} \sum_{i=1}^{Np(h)} [Z_{(x_i)} - Z_{(x_i+h)}]^2 \quad (Ec.5)$$

Donde:

$Np(h)$ = número de pares a una distancia h

h = distancia de separación entre puntos

$Z_{(x_i)}$ = valores muestrales

x_i = localizaciones donde son medidos los valores $Z_{(x_i)}$

En el semivariograma se presentan tres elementos importantes en la variabilidad de un atributo, estos son: la discontinuidad en el origen (existencia de efecto de pepita “ C_0 ”), el valor máximo de variabilidad (meseta “ C ”), y el área de influencia de la correlación espacial (alcance “ a ”), (Figura 2) (Hengl, 2007). Los modelos se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Modelos utilizados para ajustar el semivariograma.

Modelo	Formula
Esférico	$g(h) = C [(3/2)*(h/a) - 1/2(h/a)^3] \quad h \leq a$
Exponencial	$g(h) = C [1 - \text{Exp}(- h /a)] \quad h > 0$
Gaussiano	$g(h) = C [1 - \text{Exp}(- h ^2/a^2)] \quad h > 0$
Modelo con Función Potencia	$g(h) = h ^a$ con $a \in [0, 2]$ a : Exponente de la función.

El modelo que mejor se ajustó fue el modelo esférico. Una vez seleccionado el modelo se aplicó el método de interpolación conocido como kriging; el cual es un método geoestadístico de estimación de puntos que utiliza un modelo de semivariograma para la obtención de los datos. Donde generalmente se cumple que los lugares que disten menos entre sí tendrán valores de los atributos más semejantes que los correspondientes a los puntos o bloques que estén más separados. Moral (2004), establece que el kriging cuenta con ciertas características que lo hace un método superior a los demás, dentro de esas características se menciona que mediante el kriging se minimiza la varianza del error esperado (diferencia entre el valor real y el estimado). Como el valor real en un punto no muestral es desconocido, el kriging emplea un modelo conceptual con una función aleatoria asociada a los valores reales para estimarlo. Con esta técnica se elaboran los mapas kriging.

El primer paso para el análisis de la estructura espacial de las variables estudiadas es la construcción de los semivariogramas, con la construcción de este instrumento estadístico se puede conocer que tan parecidos son los puntos en el espacio a una determinada distancia, es decir, se determina la distancia hasta la cual existe correlación espacial entre los mismos.

El semivariograma se obtuvo utilizando dos subrutinas del software estadístico R (Bivand, 2007); el Gstat el cual posee métodos específicos para el estudio espacial de las variables y el paquete Lattice, que permite la creación y manipulación de diversos gráficos del área de la Geoestadística. A continuación se presentan los resultados correspondientes al semivariograma unidireccional para la variable volumen. El cuadro 2, contiene la información para la construcción del semivariograma, y en la figura 3, presentan la grafica del semivariograma, para la variable volumen.

Cuadro 2. Valores de los semivariogramas para la variable volumen.

NP	Distancia	Semivarianza
68581	6,97	0,009197
178060	15,49	0,009641
297995	25,29	0,009988
364872	35,12	0,010264
464480	45,02	0,010436
506374	55,16	0,010589
556677	65,04	0,010688
586585	74,99	0,010897
594607	84,95	0,011128
621079	95,03	0,011295
566119	104,96	0,011304
590222	114,84	0,011309
563479	124,98	0,011245
511165	134,99	0,011240
467282	144,86	0,011339

NP: número de pares a una distancia h.

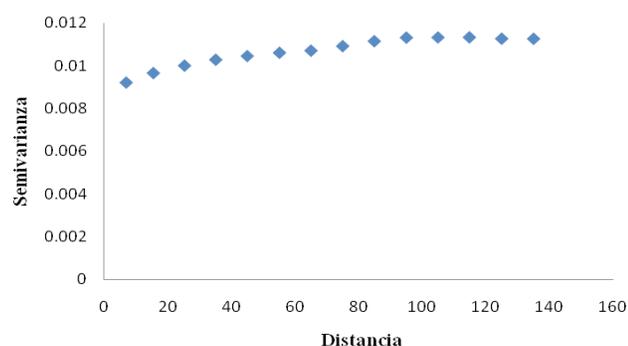


Figura 3. Semivariograma variable volumen.

La siguiente fase en el análisis de la estructura espacial fue ajustar un modelo teórico a los diferentes semivariogramas, lo que se conoce como “Modelo Teórico del Semivariograma”, el cual permite establecer los valores de los parámetros que caracterizan al mismo, los modelos utilizados para hacer el ajuste, fueron: a) Lineal, b) Gaussiano, c) Esférico, y d) Exponencial..

En esta investigación se realizó el ajuste de dos formas, la primera fue de manera visual y la segunda fue utilizando el método de los mínimos cuadrados ponderados (Figura 4).

Los parámetros del semivariograma juegan un papel muy importante al momento de realizar un estudio geoestadístico, en especial el valor del alcance, conocido como alcance máximo ya que es aquella distancia hasta la cual existe correlación espacial entre las observaciones. Finalmente para la variable volumen al realizar el ajuste visual se tomaron como valores iniciales de los parámetros los siguientes efecto pepita $0,009 \text{ m}^3$, la meseta $0,0115 \text{ m}^3$ y como alcance 125 metros, resultando por el método de los mínimos cuadrados un valor de $0,009271945 \text{ m}^3$ para el efecto pepita, $0,0112 \text{ m}^3$ para la meseta, y como alcance máximo se encontró que toma el valor de $115,7933 \text{ m}$.

Siendo el alcance, h, el parámetro de mayor importancia en el ajuste de los modelos, se compararon los tres valores proporcionados por cada uno de los semivariogramas, llegando a la conclusión que el valor obtenido por el semivariograma correspondiente a la variable altura es el que in-

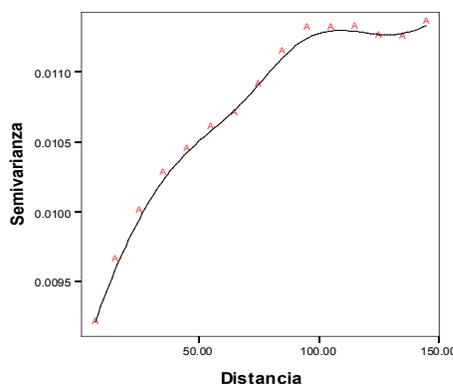
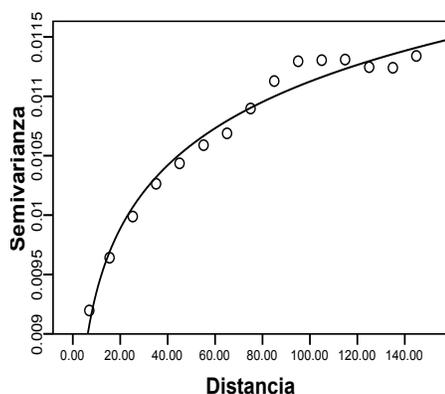


Figura 4. a) ajuste de forma visual y b) ajuste por mínimos cuadrados ponderados para la variable volumen.

dica y asegura que a una distancia de separación entre pares de puntos mayor o igual a 133,8371 m, no existirá correlación espacial entre las observaciones.

Con los mapas kriging se logra estimar valores de las variables en aquellos lugares donde no se posee información. Se construyeron los tres mapas de estimación correspondiente para cada una de las variables estudiadas, por medio de los cuales además de estimar los valores ausentes en la base de datos, proporcionan información acerca de las posibles regiones de la población donde se encuentran árboles con mayores o menores valores para cada una de las variables estudiadas V, AB y N.

En la figura 5, se presenta el mapa kriging de la variable volumen. Haciendo uso del correlograma se establecen diversas intensidades de correlación relacionadas a la distancia de separación entre los datos, comenzando con una distancia de 50 metros (correlación máxima) proporcionando una intensidad de muestreo del 10%, la cual es la máxima aplicada en la práctica, terminando con la distancia obtenida por parte del semivariograma de 133,8371 m (correlación mínima), o cero correlación.

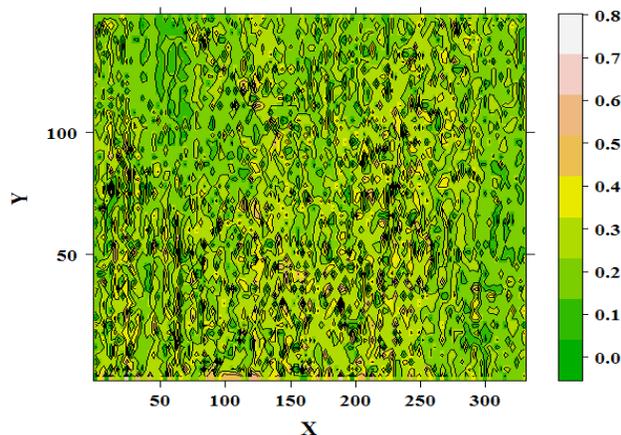


Figura 5. Mapa kriging del volumen de los árboles.

3. Discusión y análisis de resultados

El estudio de la estructura espacial de las variables de interés, aportó importante información que luego fue utilizada para desarrollar los programas de simulación. Del análisis de la estructura espacial el principal aporte fue la distancia mínima que debe existir entre las observaciones de los datos (centro - centro de dos Parcelas Circulares de Área Fija

Contiguas), para lograr que no exista correlación espacial entre las mismas; esta fue de 133 m, este valor se tomó como información para el diseño de los programas de simulación, además, en base a esta distancia se establecieron diferentes intensidades de correlación e intensidades de muestreos, es decir, se varió el valor de la distancia comenzado desde un valor mínimo de 50 metros y finalizando en un valor máximo, el obtenido del análisis de la estructura espacial (133 m). Estas variaciones de las distancias se realizan con el objetivo de simular por medio de los programas diseñados, el comportamiento y la calidad de los estimadores para poder conocer cuál de las distancias arroja mejores resultados.

En el cuadro 3, se presenta resumida la información obtenida por parte del análisis de la estructura espacial, la cual fue el punto de partida para el diseño de los programas de simulación, se presentan los valores correspondientes a las distancias y sus correspondientes intensidades de correlación e intensidades de muestreo.

De manera adicional se calculó el número de parcelas que se debe tomar como muestras al momento de aplicar los diseños de muestreos; en función de la distancia de separación entre las parcelas.

Cuadro 2. Información del análisis de la estructura espacial.

Distancia	Alcance Máx.	Correlación	I%	Parcelas
50	133,84	0,466	10,000	18
61	133,84	0,364	6,719	14
75	133,84	0,247	4,444	10
87	133,84	0,162	3,303	8
97	133,84	0,103	2,657	7
105	133,84	0,065	2,268	5
120	133,84	0,015	1,736	4
133,84	133,84	0,000	1,396	3
145	133,84	0,000	1,189	2

El programa para simular los métodos de PCAF-SAA y el de PCAF-CA, ejecuta un número de 5000 iteraciones; número con el cual se obtienen resultados confiables para realizar el análisis.

Los criterios estadísticos utilizados para evaluar la calidad de los estimadores fueron: el sesgo relativo (SR), la varianza (S^2) y la raíz del error cuadrático medio (RECM), a continuación se presentan las graficas y los resultados correspondientes a estos estimadores.

En el cuadro 4, se presentan los resultados obtenidos por el método de PCAF-SAA; para la variable volumen.

Cuadro 4. Resultados para la variable volumen total.

Distancia	Sesgo R %	Varianza	RECM*
50	5,16	1572,97	68,14
61	9,03	3766,16	114,73
75	17,21	13265,13	217,76
87	10,14	4182,14	126,63
97	13,63	9321,86	175,32
105	1,73	8093,15	91,86
120	1,98	4709,87	71,83
133	1,59	4154,90	66,69
145	5,10	12033,50	122,62

* Raíz del error cuadrático medio.

En la figura 7 se aprecian los valores del sesgo relativo (SR) obtenidos por el método de muestreo de PCAF-SAA, observando que los valores de SR, presentan grandes oscilaciones entre las distancias de 50 y 97 m, a partir de 105 m las oscilaciones se hacen menores alcanzando un sesgo mínimo en la distancia de 133 m. El comportamiento del RECM es muy similar a los valores del sesgo relativo, alcanzando el mínimo a la distancia de 133 m (Figura 8).

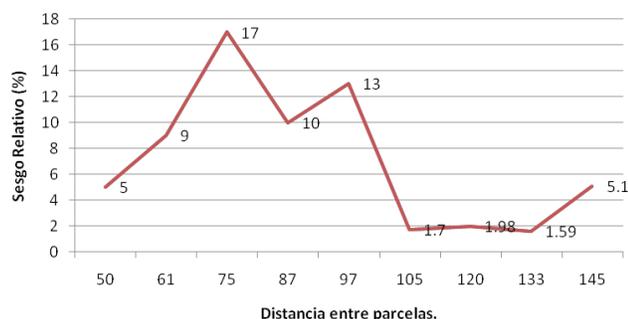


Figura 7. Valores de sesgo relativo para la variable volumen total.



Figura 8. Valores de la raíz del error cuadrático medio (ECM) para la variable volumen total.

Por último se presentan los resultados obtenidos por medio del programa que simula el muestreo PCAF-CA, donde no se toma en cuenta ninguna distancia, ya que las parcelas para tomar las muestras son seleccionadas aleatoriamente. En el cuadro 5, se presentan estos resultados para la variable volumen total.

Cuadro 5. Resultados para la variable volumen total.

N. Parcela	Sesgo R %	Varianza	RECM*
18	7,02	2542,24	90,67
14	7,06	3175,44	94,45
10	7,01	2635,70	91,07
8	7,07	3261,37	95,02
7	7,01	6456,67	110,13
5	7,22	14833,14	144,35
4	7,13	15364,78	145,67
3	7,16	15142,21	145,09
2	7,08	23019,79	169,71

*RECM=Raíz del Error Cuadrático Medio.

Se observa que los valores de la varianza correspondiente a la variable volumen, presentan una tendencia a disminuir su valor a medida que el número de parcelas aumenta. De igual forma ocurre con los valores de la raíz del error cuadrático medio (RECM) disminuyen a medida que aumentan las observaciones tomadas como muestras. Las demás variables, Área Basal (AB) y Número de Árboles (N), presentan un comportamiento similar en todos criterios de evaluación estadísticos, para ambos muestreos.

4. Conclusiones y recomendaciones

El análisis geoestadístico permitió encontrar un modelo espacial (modelo esférico) que se ajustara de manera eficiente a los datos de los semivariogramas obtenidos, este modelo permite obtener de manera exacta el valor del parámetro (alcance); el valor de la distancia mínima de separación que debe existir entre las observaciones para que no exista correlación espacial entre las mismas. En este estudio la distancia a la cual la correlación se hace cero, en base a los datos analizados, fue de 133,83 m.

La implementación de los mapas kriging como método de estimación permite de manera gráfica tener conocimiento general de la distribución espacial de las variables contenidas en la población estudiada y de forma adicional la ubicación de posibles conglomerados de observaciones de iguales características así como la presencia de grandes sectores de datos ausentes.

Como se puede apreciar en las figuras 7 y 8, correspondientes a los criterios estadísticos de los estimadores para la variable volumen, existe una tendencia clara indicando que se producen grandes oscilaciones de los valores de los criterios utilizados (SR, S^2 , y RECM) a distancias menores, las cuales se hacen cada vez más pequeñas a medida que aumenta la distancia de separación entre parcelas, alcanzándose el óptimo (valores menores del sesgo relativo (SR) y de la raíz del error cuadrático medio (RECM)) en la distancia obtenida del análisis de la estructura espacial; de 133 metros (h). Comportamiento similar ocurrió con las variables área basal y número de árboles. Se observa que la Varianza (precisión) en la obtención de los estimadores disminuye a medida que se toma un mayor número de observaciones por muestra.

Los diferentes programas de simulación realizados pueden ser utilizados en otras áreas de investigación como en la ecología, biología entre otras, donde se utilice como forma de selección de muestras la forma de las parcelas. Los programas de simulación presentaron rapidez de ejecución de las simulaciones.

Usualmente las empresas utilizan distanciamiento entre parcelas de 100 metros, sin embargo, de acuerdo a los resultados de este estudio se recomienda utilizar una distancia mínima de separación entre parcelas de 133 metros; lo cual influiría en un menor número de parcelas a ser muestreadas con respecto a los distanciamientos anteriores. Lo que se traduce en ahorro de tiempo, mano de obra y recursos económicos, ganando en precisión al estimar los parámetros (V, AB y N).

Se recomienda replicar este estudio bajo diferentes condiciones de los parámetros que afecten las variables volumen total (V), área basal (AB) y números de árboles (N) tanto en plantaciones como en bosques naturales.

5. Referencias bibliográficas

- ALFARO, M. 2005. La Teoría de las Variables Regionalizadas y sus Aplicaciones. En línea: http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/2005/MATHERON/Ouvrage/DOC_00536/MATHERON_Ouvrage_00536.pdf [Consultado: 23/11/2010].
- BIVAND, R. 2007. *Analyzing Spatial Data in R*. Norwegian School of Economics and Business Administration. Bergen, Norway. 155 p.
- COCHRAN, W. 1997. *Técnicas de Muestreo*. CIA. Editorial Continental S.A de C.V. México D.F., México. 205 p.
- MORAL, F. 2004. *Aplicación de la Geoestadística en las Ciencias Ambientales*. Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente. Barcelona, España. 178 p.
- QUINTERO, M. y M. DURÁN. 2008. Aplicación de dos pruebas estadísticas de bondad de ajuste en muestras complejas: un caso práctico en el campo forestal. Colegio de Postgraduados. México. *Agrociencia* 42: 287-297.
- SCHREUDER, T., G. HANS, G. TIMOTHY y W. B. GEOFFREY. 1993. *Sampling Methods for Multiresource Forest Inventory*. John Wiley. New York, USA. 236 p.
- SMURFIT CARTÓN DE VENEZUELA. 2007. World Wide. En línea: <http://www.smurfitkappa.com.ve/> [Consultado: 30/11/2010].
- OVERTON, W. y V. STEHMAN 1995. The Horvitz-Thompson Theorem as a Unifying Perspective for Probability Sampling: With Examples From Natural Resource Sampling. *The American Statistician* 49 (3): 261-268.
- HENGL, T. 2007. *A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables*. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. Luxembourg, Luxembourg. 182 p.