

DEFINICION DE SUB-RODALES PARA UNA SILVICULTURA DE PRECISION: UNA APLICACION DEL METODO FUZZY K-MEANS

J.A. ORTEGA¹, W. FOSTER¹ y R. ORTEGA²

¹Departamento de Economía Agraria.

²Departamento de Ciencias Vegetales.

Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal.

Pontificia Universidad Católica de Chile.

Casilla 306-22, Santiago, Chile

Abstract

J.A. Ortega, W. Foster and R. Ortega. Definition of sub-stands for Precision Forestry: an application of the fuzzy k-means method. One elementary strategy for applying precision forestry is based in the definition of homogeneous management zones, or sub-stands. This article reports on the application of the fuzzy k-means method for defining and selecting a suitable number of sub-stands for the purpose of assigning precise management schemes for plantations of *Pinus radiata* D. Don beginning at four years of age. Four representative stands belonging to Forestal Mininco, S.A. were selected for this study. For sub-stand classification, observations of seven variables related to tree growth were available from inventory measurements taken from grid sampling. The selection of the suitable number of sub-stands was made based on functional validity measures: the fuzzy performance index (FPI) and the modified partition entropy (PME). A mapping of sub-stands was made using the Kriging method of interpolation, and a regression model was estimated to determine significant differences of wood volume ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) between sub-stands. The measures of functional validity imply the division of the stands into four to six sub-stands, a division supported by the coherence of sub-stand mapping and the results of the regression analysis. The results of the study indicate the potential utility of the fuzzy k-means method of homogeneous sub-stand definition for precision forestry.

Key words: precision forestry, sub-stands, fuzzy k-means, *Pinus radiata*, Kriging's method.

*Cien. Inv. Agr.*29(1):35 - 44. 2002.

INTRODUCCION

Desde principios de los años 90 se han venido desarrollado nuevas tecnologías que ofrecen el potencial de mejorar la competitividad y sostenibilidad de la agricultura. Estas nuevas tecnologías son principalmente la biotecnología y la agricultura de precisión (AP). Esta última, conocida también como manejo sitio específico (MSE), es definida por Pierce y Nowak (1999) como "la aplicación de tecnologías y principios al manejo de la variabilidad espacial y temporal de todos los aspectos de la producción agrícola con el propósito de mejorar el rendimiento de los cultivos y la calidad ambiental". En términos simples la AP consiste en la aplicación variable de insumos dentro de

los campos de cultivos, según el potencial productivo y riesgo ambiental de cada sitio. Desde que se realizó la primera conferencia internacional en la Universidad de Minnesota en 1992, la AP ha tenido un gran desarrollo y difusión, principalmente en los Estados Unidos, Europa y Australia. Los principales estudios y aplicaciones se han realizado en la fertilización de cultivos como maíz, remolacha, soya y algodón.

En América Latina, especialmente en Argentina, Brasil y Chile, se ha empezado a tener algunas experiencias de adaptación de la tecnología. En el caso de Chile, los estudios de adaptación los ha venido realizando el Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile (INIA), desde 1997. En 1999 se realizó en Chile el

primer seminario internacional sobre Agricultura de Precisión (Ortega y Flores, 1999). Recientemente en la Pontificia Universidad Católica de Chile, con el financiamiento del Fondo para la Innovación Agraria (FIA), se creó un Centro de Agricultura de Precisión, el cual tiene como objetivo desarrollar las bases para la aplicación de esta tecnología en Chile y en otros países de Latinoamérica.

Los principios de la AP aplicados a las plantaciones forestales darían origen a una Silvicultura de Precisión (SP) o Silvicultura Sitio Específica (SSE). La SP se encuentra en una etapa de menor desarrollo que la AP. Sin embargo, la creciente tendencia hacia la certificación forestal ha propiciado la adopción de mejores prácticas de manejo (MPM) y con ello la factibilidad de aplicar una SP. Últimamente han aparecido varios elementos que propiciarían el desarrollo de la SP, entre otros: (1) la edición de un número especial sobre la importancia de la modelación espacial en la revista *Forest Science* en el año 2000 (Murray y Snyder, 2000); (2) la creación en el año 2001 de una Cooperativa de Silvicultura de Precisión en la Universidad de Washington, Estados Unidos (Precision Forestry Cooperative, 2001), y (3) la realización del primer simposio organizado por esta cooperativa en julio del 2001.

En Chile, en la X Silvotecnica, organizada por la Corporación Chilena de la Madera en 1998, se presentó por primera vez un análisis de la factibilidad técnica de realizar manejos sitio-específicos en plantaciones forestales, tomando como base la agricultura de precisión (Ortega, 1998). De acuerdo a este autor, la SP sería factible en las etapas de establecimiento de las plantaciones, en la asignación de esquemas de manejo y en la cosecha. Algunos factores que facilitarían su aplicación en la industria forestal de Chile serían: (1) la iniciativa chilena de certificación forestal para poder competir en el mercado mundial; (2) la organización de la industria forestal, caracterizada, principalmente, por empresas privadas de gran tamaño, integradas verticalmente y con recurso humano altamente calificado; (3) el uso común de modelos matemáticos para la planificación y tecnologías de información, y (4) el uso histórico de inventarios con los cuales se ha reconocido la pre-

sencia de variabilidad espacial.

Uno de las estrategias básicas para la aplicación de la SP se fundamenta en el uso de zonas homogéneas de manejo o sub-rodas, definidos mediante el uso de métodos matemáticos de clasificación de grupos. En el caso de la silvicultura convencional el concepto de rodal se basa en la homogeneidad de los rodales en cuanto a la especie y edad, pero no en otros factores como la topografía y el tipo de suelo. Los rodales se definen durante la habilitación de los terrenos en base a la experiencia de los técnicos y a características topográficas macro (pendiente, caminos, ríos, quebradas, etc.). En la literatura se mencionan varios métodos usados para la clasificación de grupos, dentro de los cuales están el análisis de componentes principales, el análisis jerárquico de grupos, las redes neuronales y el método fuzzy k-means (FKM). Este último método ha sido utilizado exitosamente por muchos autores para la clasificación de suelos (Burrough *et al.*, 1992; McBratney y Gruijter, 1992; Fridgen *et al.*, 2000; Van Alphen y Stoorvogel, 2000, y Triantafilis *et al.*, 2001). Otros autores han demostrado que el método FKM es el más adecuado para la clasificación de fenómenos continuos (Guler *et al.*, 2001; Schreier *et al.*, 1999).

El objetivo de este trabajo fue aplicar el método FKM en la definición de sub-rodas homogéneas para planificar esquemas de manejo (podas y raleos) más precisos en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don a partir de los cuatro años de edad. La clasificación se basa en variables de crecimiento y se realizó en cuatro rodales representativos del patrimonio de la empresa Forestal Mininco S.A.

MATERIALES Y METODOS

Los datos para el análisis fueron tomados de los inventarios realizados en plantaciones de cuatro años de edad (EPE 4) de Forestal Mininco S.A., en el año 2000. El inventario consistió en un muestreo sistemático con una intensidad de aproximadamente una parcela por cada cuatro hectáreas, las cuales se georeferenciaron en la planificación, pero no durante la

ejecución del inventario. En un inventario tipo, en cada parcela se revisan cuatro árboles por cuadrante, se identifican los vivos y se mide el árbol más cercano al centro de la parcela. Se seleccionaron cuatro rodales representativos de las principales zonas de crecimiento y grupos de suelos. Sus características y los mapas con la ubicación de las parcelas de inventario se presentan en la Tabla 1 y Figura 1, respectivamente.

Tabla 1. Descripción de los rodales de *Pinus radiata* a los cuatro años de edad.

Description of the stands of Pinus radiata at four years of age.

Variable	Rodaless			
	R105-9601	R203-9601	R326-9603	R903-9604
Número parcelas rodal	36	33	92	30
Superficie rodal (ha)	149,2	134,1	401,1	120,4
Nombre fundo	Pinares	Gomero	Colicheu	Los Alamos
Superficie fundo (ha)	2374,2	1190,8	4843,3	3192,2
Zona de crecimiento	VI	VII	V	VI
Grupo de suelos	Metamórficos	Graníticos	Arenas	Sed.Marinos

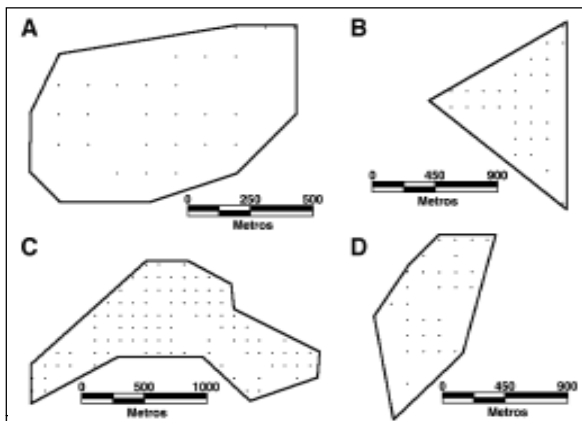


Figura 1. Mapas de los rodales con la ubicación de las parcelas de inventario: (A) 105-9601; (B) 203-9601; (C) 326-9603, y (D) 903-9604.

Maps of the stands with the location of the sample parcels: (A) 105-9601; (B) 203-9601; (C) 326-9603, y (D) 903-9604.

de aplicar esquemas de poda y raleo sitio específico, se seleccionaron las siguientes variables de crecimiento:

- Densidad: número de árboles vivos por hectárea ($n.ha^{-1}$)
- Diámetro: diámetro a 1,3 metros de altura (cm)
- Altura: altura total promedio (m)
- Área Basal: superficie de madera por hectárea ($m^2.ha^{-1}$)
- Índice de Sitio: altura promedio de los 100 árboles de mayor diámetro por hectárea a una edad de 21 años (m)
- Diámetro sobre muñón: diámetro de madera libre de nudos que se desarrolla después de las podas (cm)
- Volumen podable: proporción del volumen de madera que de acuerdo a la calidad del fuste de los árboles se considera que es podable (cm^3).

Estas variables de crecimiento son el resultado de la variación intrínseca del suelo y de la topografía, e influyen directamente en la evaluación y selección de los esquemas de manejo óptimos, específicamente la densidad, el índice de sitio y el área basal. Se eliminaron los valores extremos de cada variable usando el criterio de ± 3 desviaciones estándar. Debido a diferencias en las unidades de medida, las variables se estandarizaron de tal manera que la media fuera cero y la desviación estándar igual a uno. Los valores promedio de estas variables por rodal se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores promedio de variables de crecimiento por rodal, *Pinus radiata* de cuatro años de edad.

Average values of growth variables by stands, Pinus radiata at four years of age.

Variable	Rodaless			
	R105-9601	R203-9601	R326-9603	R903-9604
Densidad ($n.ha^{-1}$)	790	863	1067	691
Diámetro (cm)	8,6	6,4	5,7	8,8
Altura (m)	5,4	4,8	4,1	5,1
Área Basal ($m^2.ha^{-1}$)	4,9	3,2	3,5	4,5
Índice Sitio (m)	36,7	33,2	29,6	34,5
Diámetro sobre muñón (cm)	13,5	10,4	9,3	15,1
Volumen Podable (%)	42,1	67,8	35,5	56,8

Para la conformación de los sub-rodales, con fines

La definición de los sub-rodales se realizó con el

procedimiento FKM o método de clasificación continua. FKM es un procedimiento de clasificación óptima que se utiliza en fenómenos geográficos, en los cuales los contornos de los grupos o clases no están claramente definidos, como por ejemplo tipos de suelo, clases de vegetación, grupos socio-económicos, entre otros (Burrough y McDonnell, 1998). La clasificación continua de objetos y atributos se basa en la teoría de conjuntos imprecisos o poco definidos (fuzzy set) propuesta por Zadeh (1965) e implementada en el algoritmo FKM por Ruspini (1969), Bezdek (1974) y Dunn (1974), y generalizada al algoritmo “fuzzy k-means with extragrades” (FKME) por McBratney y Gruijter (1992). La teoría fuzzy set es una generalización del álgebra Booleana, por lo que existe la posibilidad de que la función de pertenencia a los grupos se encuentre en el rango 0-1; es decir un individuo puede pertenecer totalmente a una clase, a todas o a ninguna (Burrough *et al.*, 1992).

Según McBratney y Gruijter (1992) el procedimiento FKM minimiza la siguiente función objetivo:

$$J(M, C) = \sum_{i=1}^n \sum_{c=1}^k m_{ic}^{\phi} d_{ic}^2 \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{c=1}^k m_{ic} = 1$$

$$\sum_{i=1}^n m_{ic} > 0$$

$$m_{ic} \in [0, 1]$$

donde $J(M, C)$ es la suma de errores al cuadrado dentro de las clases, $M = (m_{ic})$ es la matriz de $n \times k$ de pertenencia a los grupos ($m_{ic} = 1$ si el individuo pertenece a la clase c y 0 lo contrario), $C = (c_{cv})$ es la matriz $k \times p$ de centro de las clases (c_{cv} denota el valor del centro de la clase c para la variable v), x_{vi} es el vector del valor de la variable v del individuo i , c_c es el vector del centro de las clases, f es el grado de imprecisión de la solución (fuzziness exponent) y d_{ic}^2 es el cuadrado de la distancia entre x_{vi} y c_c . El algoritmo de solución de la función objetivo consta de las siguientes etapas iterativas:

(si $k = 1$ o n el análisis no es necesario);

- Seleccionar el valor del fuzziness exponent f , con $f > 1$. Los valores comúnmente usados están en el rango de 1,1 a 2;
- Seleccionar la definición de distancia en el espacio variable. Las dos distancias usadas son la Euclidiana y Mahalanobis;
- Seleccionar un valor del criterio de detención e ($e = 0,001$ da una convergencia razonable);
- Iniciar con $M = M_0$, por ejemplo con una agrupación aleatoria o con una agrupación de partición rígida (hard k-means);
- En las iteraciones $l = 1, 2, 3, \dots$ re-calcular $C = C_l$ usando M_{l-1} y la ecuación 2

$$C_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ic}^{\phi} X_i}{\sum_{i=1}^n m_{ic}^{\phi}} \quad (2)$$

- Recalcular $M = M_l$ usando C_l y la ecuación 3:

$$m_{ic} = \frac{d_{ic}^{-2/(f-1)}}{\sum_{j=1}^k d_{ij}^{-2/(f-1)}} \quad (3)$$

- Comparar M_l con M_{l-1} siguiendo una regla matricial conveniente. Si $\|M_l - M_{l-1}\| \leq e$, entonces parar; de otra manera retornar a la etapa 6.

La aplicación del método se hizo con el software FUZME 2,1, desarrollado por el Centro Australiano de Agricultura de Precisión (Australian Centre for Precision Agriculture, 2000). Se seleccionó la distancia métrica Euclidiana y un fuzziness exponent de 1,30. El número de sub-rodas definidos fue de 2 hasta 15. El número adecuado de sub-rodas se determinó usando dos medidas de validez funcional: 1) el índice de desempeño del grado de ambigüedad (Fuzziness Performance Index, FPI) y 2) la entropía modificada de partición modificada (Modified Partition Entropy, MPE). El FPI es una medida del grado en la cual los miembros participan en las distintas clases (imprecisión), y MPE indica el grado de desor-

- Seleccionar el número de clases k , con $1 < k < n$

ganización de la clasificación. A menor ambigüedad y menor desorganización el número de clases es considerado adecuado (Triantafilis *et al.*, 2001).

Después de seleccionar el número adecuado de sub-rodas se aplicó la técnica de muestreo "Jackknife" para mejorar la asignación de los individuos (parcelas) a cada uno de los sub-rodas. Usando el criterio del máximo valor de la función de agrupación (maximum membership value) se realizó un mapa con los sub-rodas. Se interpolaron los valores discretos de los sub-rodas (1,2, 3...), usando el método Kriging asumiendo un variograma lineal.

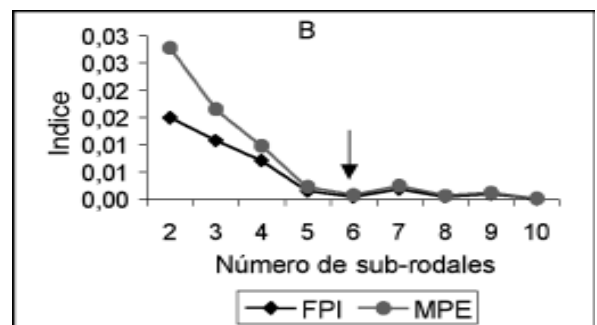
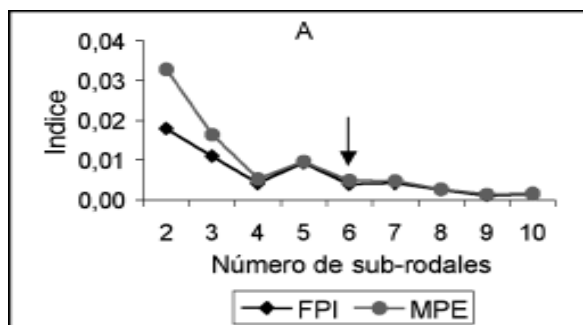
Por último se realizó un análisis de regresión por el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) para determinar diferencias significativas entre los sub-rodas. Se seleccionó como variable dependiente el volumen de madera por hectárea ($m^3 \cdot ha^{-1}$), ya que ella representa una síntesis de las siete variables usadas en la clasificación. El modelo usado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \alpha_0 + \sum_{j=1}^{k-1} \beta_j D_j + \varepsilon_i \quad (4)$$

donde Y_{ij} es el volumen de madera por hectárea ($m^3 \cdot ha^{-1}$), D es un conjunto de variables dicotómicas que representa a los $k-1$ sub-rodas j (cada variable toma el valor de 1 para el sub-rodal j y de 0 para los otros sub-rodas), α_0 y β_k son los parámetros del modelo, ε_i es el término de error, el cual se asume que tiene una distribución normal, con media 0, varianza constante y sin correlación serial.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 2 se presentan los índices de validación funcional (FPI y MPE) para seleccionar el número adecuado de sub-rodas. Los resultados indican una pobre separación de las zonas con dos y tres sub-rodas. A partir de los cuatro sub-rodas los indicadores tienden a estabilizarse, y el número adecuado de sub-rodas se encontraría entre cuatro a ocho sub-rodas. Un parámetro que influye en el comportamiento de estos indicadores es el fuzziness exponent (f), por lo tanto lo que debiera hacerse es combinar distintos niveles de este parámetro con el número de clases (Triantafilis *et al.*, 2001). Por otro lado, Fridgen *et al.*, (2000), al realizar una clasificación de suelos, han complementado el uso de FPI y MPE con una medida de la reducción relativa de la varianza del rendimiento de los cultivos. Otros autores como Fleming y Westfall (2000) y Van Alphen y Stoorvogel (2001) han utilizado el análisis de varianza (ANOVA) para determinar la "eficiencia" de la clasificación. El procedimiento seguido en este trabajo (y que se presenta más adelante) fue visualizar la conformación de los sub-rodas y realizar un análisis de regresión con variables dicotómicas. En todo caso, un análisis más objetivo sería el uso de procedimientos de optimización que consideren la reducción de la varianza del rendimiento (riesgo de producción), los costos y los beneficios marginales, así como también que imponga restricciones técnicas, como el área mínima de los sub-rodas.



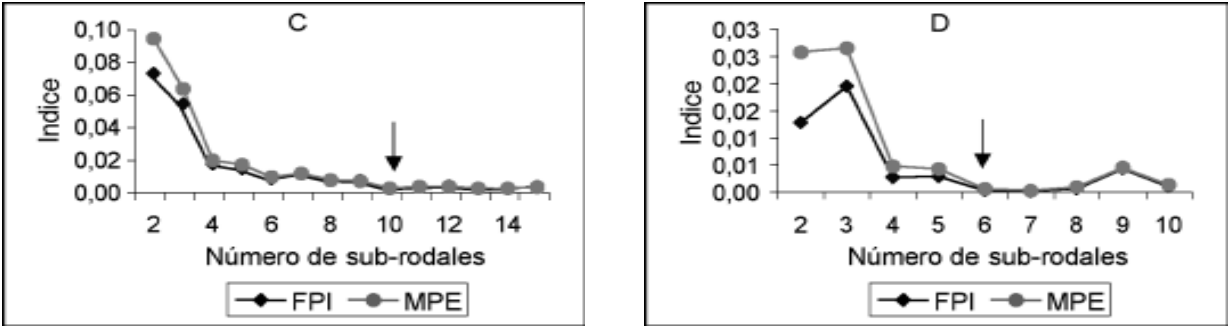


Figura.2. Índice de desempeño del grado de ambigüedad (FPI) y entropía modificada de la partición (MPE) por rodal: (A) 105-9601; (B) 203-9601; (C) 326-9603, y (D) 903-9604.
Fuzziness Performance Index (FPI) and the Modified Partition Entropy (MPE) by stand (A) 105-9601; (B) 203-9601; (C) 326-9603, y (D) 903-9604.

En las Figuras 3, 4, 5 y 6 se presentan los mapas de cada rodal con 2, 4, 6 y 8 sub-rodales. En general se observa una buena conformación con cuatro a seis sub-rodales, incluso hasta con ocho, excepto para el caso del rodal 326_9603. En términos prácticos se determinó que el número adecuado de sub-rodales era de seis, cuya descripción se presenta en las Tablas 3, 4, 5 y 6. El supuesto implícito es que el número de sub-rodales definidos es técnicamente factible de manejar. En todo caso es necesario realizar un análisis de costo-beneficio para determinar la factibilidad económica de realizar esquemas de manejo diferenciados por sub-rodales.

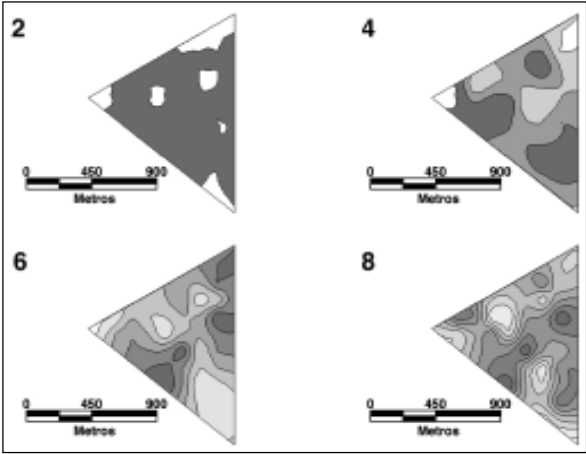


Figura 4. Conformación de 2, 4, 6 y 8 sub-rodales en el rodal 203-9601.
Conformation of 2, 4, 6, y 8 sub-stands in the stand 203-9601.

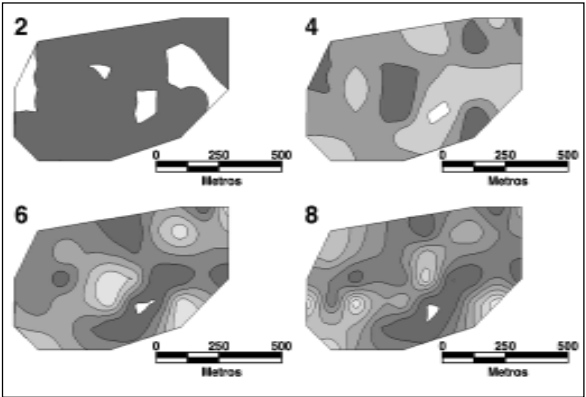


Figura 3. Conformación de 2, 4, 6 y 8 sub-rodales en el rodal 105-9601.
Conformation of 2, 4, 6 y 8 sub-stands in the stand 105-9601.

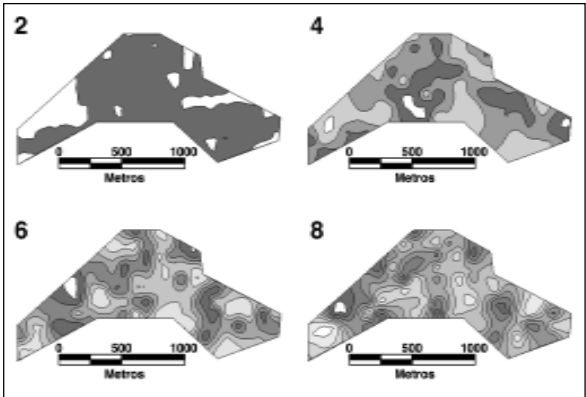


Figura 5. Conformación de 2, 4, 6 y 8 sub-rodales en el rodal 326-9603.
Conformation of 2, 4, 6, y 8 sub-stands in the stand 326-9603.

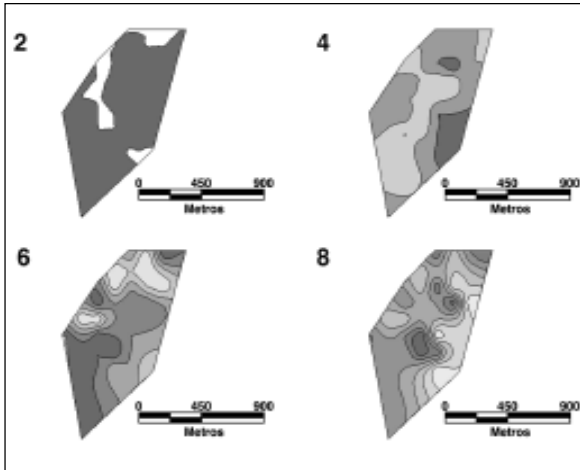


Figura 6. Conformación de 2, 4, 6 y 8 sub-rodas en el rodal 903-9604.

Conformation of 2, 4, 6 y 8 sub-stands in the stand 903-9604.

Los análisis de regresión con variables dicotómicas para seis sub-rodas fueron altamente significativos, presentaron un coeficiente de correlación alto y los errores fueron normales y homocedásticos (Tabla 7). En el caso del rodal 326_9601 se transformó la variable dependiente a logaritmo natural para tener un mejor comportamiento en los errores. Estos resultados muestran que el número de sub-rodas estadísticamente diferentes es de cinco para los rodales 105_9601 y 903_9604, cuatro para el rodal 203_9601, seis para el rodal 326_9603.

Tabla 3. Promedio de las variables de crecimiento por sub-rodal, rodal 105-9601.

Average values of variables of growth by sub-stands, stand 105-9601.

Variable	Sub-rodas (SR)					
	SR1	SR2	SR3	SR4	SR5	SR6
Superficie (ha)	27,7	31,6	23,7	11,9	19,8	27,7
Densidad (n.ha ⁻¹)	752	847	959	767	632	741
Diámetro (cm)	7,4	8,4	9,5	7,3	9,4	9,3
Altura (m)	4,9	5,3	5,7	4,7	5,6	6,3
Area Basal (m ² .ha ⁻¹)	4,0	4,9	6,8	3,3	4,4	5,4
Indice Sitio (m)	35,7	36,3	37,7	34,0	37,4	38,0
Diámetro sobre muñón (cm)	12,0	12,6	15,3	13,0	13,4	14,6
Volumen Podable (%)	53,8	21,1	47,8	58,9	39,7	43,9

Tabla 4. Promedio de las variables de crecimiento por

sub-rodal, rodal 203-9601.

Average values of variables of growth by sub-stands, stand 203-9601.

Variable	Sub-rodas (SR)					
	SR1	SR2	SR3	SR4	SR5	SR6
Superficie (ha)	16,3	20,3	24,4	20,3	28,4	24,4
Densidad (n.ha ⁻¹)	1010	880	800	933	880	734
Diámetro (cm)	5,3	6,2	5,8	7,6	7,9	5,3
Altura (m)	4,3	4,4	4,7	5,6	5,3	4,2
Area Basal (m ² .ha ⁻¹)	2,5	3,2	2,0	4,8	4,6	2,2
Indice Sitio (m)	30,5	34,0	33,7	35,4	34,3	31,0
Diámetro sobre muñón (cm)	9,8	11,0	9,0	10,2	12,3	9,7
Volumen Podable (%)	43,8	60,0	100,0	67,0	63,3	63,9

Tabla 5. Promedio de las variables de crecimiento por sub-rodal en el rodal 326-9603.

Average values of variables of growth by sub-stands in the stands 326-9603.

Variable	Sub-rodas (SR)					
	SR1	SR2	SR3	SR4	SR5	SR6
Superficie (ha)	78,6	61,2	34,9	39,3	117,9	69,9
Densidad (n.ha ⁻¹)	950	1254	1026	1172	998	959
Diámetro (cm)	3,3	5,8	3,5	8,8	4,7	7,4
Altura (m)	3,2	3,9	3,0	5,4	3,9	5,1
Area Basal (m ² .ha ⁻¹)	1,2	3,5	1,0	7,3	2,2	4,6
Indice Sitio (m)	24,7	30,4	25,8	34,8	28,4	33,5
Diámetro sobre muñón (cm)	7,3	9,2	7,4	12,6	8,5	11,3
Volumen Podable (%)	0,0	31,5	100,0	32,0	46,8	40,8

Tabla 6. Promedio de las variables de crecimiento por sub-rodal en el rodal 903-9604.

Average values of variables of growth by sub-stands in the stands 903-9604.

Variable	Sub-rodas (SR)					
	SR1	SR2	SR3	SR4	SR5	SR6
Superficie (ha)	28,1	12,0	20,1	24,1	28,1	8,0
Densidad (n.ha ⁻¹)	651	571	637	781	761	627
Diámetro (cm)	9,2	6,5	8,5	9,5	8,5	11,0
Altura (m)	5,1	3,9	5,2	5,7	4,8	6,0
Area Basal (m ² .ha ⁻¹)	4,6	2,3	3,8	5,7	4,5	6,2
Indice Sitio (m)	35,4	30,7	35,0	35,8	33,4	36,1
Diámetro sobre muñón (cm)	15,4	11,4	14,8	16,9	14,6	16,9
Volumen Podable (%)	51,4	42,0	63,7	52,9	60,4	79,0

Los resultados anteriores son un indicativo de que

actualmente existe la oportunidad de mejorar la rentabilidad de la asignación de esquemas de manejo en plantaciones de *P. radiata*. Este mejoramiento vendría por el lado de seleccionar esquemas de manejo óptimo por sub-rodal, con lo cual se estaría incrementando la productividad de algunos sitios y reduciéndose los costos en otros. Este mismo enfo-

que podría aplicarse a otras actividades del ciclo forestal, como el establecimiento de las plantaciones y la cosecha. En el establecimiento de plantaciones, por ejemplo, se podrían lograr importes reducciones en costos, aumentos en productividad y reducción del riesgo ambiental en las aplicaciones de fertilizantes y plaguicidas.

Tabla 7. Parámetros estimados del modelo de regresión lineal: volumen (m³.ha⁻¹) en función de variables dicotómicas para los sub-rodales definidos (estadísticos t entre paréntesis).
Estimated parameters of the linear model regression: volume (m³.ha⁻¹) based on dummy variables for defined sub-stands (statistical t between parenthesis).

Variable	Rodales			
	R105-9601	R203-9601	R326-9603	R903-9604
Constante	22,5***	7,7***	3,1***	33,0***
(Sub-rodal 6)	(12,9)	(5,6)	(44,6)	(20,9)
Sub-rodal 1	10,5***	3,0	-1,8***	-13,9***
	(4,8)	(1,3)	(-19,0)	(-6,0)
Sub-rodal 2	-10,3***	19,8***	-0,5***	-3,1
	(-4,0)	(9,1)	(-5,3)	(-1,4)
Sub-rodal 3	-2,8	21,1***	-2,0***	-15,5***
	(-1,2)	(10,3)	(-16,7)	(-6,7)
Sub-rodal 4	14,3***	9,0***	0,6***	-14,9***
	(5,8)	(4,9)	(4,8)	(-3,3)
Sub-rodal 5	32,5***	1,5	-1,0***	-27,7***
	(9,3)	(0,8)	(-11,5)	(-8,3)
R ² ajustado	0,86	0,85	0,89	0,79
Estadístico F (P)	45,0 (0,0)***	38,2 (0,0)***	152,6 (0,0)***	22,7(0,0)***
Jarque-Bera (P)	0,27(0,87)	0,35(0,84)	1,52(0,47)	0,47(0,79)
Prueba White(P)	0,86(0,48)	1,89(0,13)	2,56(0,03)**	1,62(0,19)
No. Parcelas	36	33	92	30

¹Variable dependiente en logaritmo natural para obtener residuos normales y homocedásticos.
** significativo al 5%, *** significativo al 1%.

Por último, es necesario mencionar que este enfoque de “clasificación” puede utilizarse en las empresas forestales para definir con mayor precisión las zonas de crecimiento, los rodales durante el establecimiento de las plantaciones y las unidades de corta. La utilización de modelos que integren sistemas expertos dentro de sistemas de información geográfica, podrían ayudar en este propósito. Un ejemplo de ellos es el modelo de inferencia de suelo y tierra (SoLIM, por sus siglas en inglés) propuesto por Zhu *et al.*, (2001). Este modelo integra el conocimiento de expertos, los sistemas de información geográfica y el mapeo basado en la lógica difusa (fuzzy logic).

CONCLUSIONES

En este trabajo se mostró la aplicación del método fuzzy k-means para definir sub-rodales homogéneos con fines de realizar las faenas de manejo silvícola con mayor precisión. En general se concluye que el método es adecuado para la definición de sub-rodales y que el número óptimo estaría entre cuatro a seis sub-rodales. Una segunda etapa de esta investigación deberá estimar el valor económico de realizar un manejo de precisión en relación al manejo promedio que actualmente se realiza en la empresa.

Futuras investigaciones deben considerar los siguientes aspectos: (1) el uso de inventarios más precisos, idealmente a nivel de árbol; (2) incluir otras variables que influyen en la selección de esquemas de manejo como la elevación, pendiente e índice de área foliar; (3) realizar una selección de las variables relevantes en base a criterios estadísticos, como el uso de factores o componentes principales; (4) evaluar diferentes parámetros del método fuzzy k-means como el tipo de algoritmo (simple, con extragrados y con igual área), la distancia métrica y el exponente fuzzy; y (5) evaluar el uso de otros criterios para seleccionar el número óptimo de sub-rodales, como el análisis costo-beneficio, que incluya restricciones técnicas como la superficie mínima de un sub-rodal. Finalmente, se debe evaluar la factibilidad de usar el método fuzzy k-means en la definición de “Rodales de Precisión” previo al

establecimiento de plantaciones y durante las diferentes etapas de manejo de las mismas.

RESUMEN

Una estrategia básica para la aplicación de una silvicultura de precisión se fundamenta en la definición de zonas homogéneas de manejo, o sub-rodales. Este artículo reporta la aplicación del método fuzzy k-means para definir y seleccionar un número apropiado de sub-rodales, con el propósito de asignar esquemas de manejo precisos en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don a partir de los cuatro años de edad. Para el estudio fueron seleccionados cuatro rodales representativos de la empresa Forestal Mininco S.A. Para la clasificación de los sub-rodales se usaron siete variables relacionadas con el crecimiento de los árboles, disponibles en las mediciones de un inventario tomado de un muestreo en grilla. La selección del número apropiado de sub-rodales se hizo considerando índices de validez funcional: el índice de desempeño del grado de ambigüedad (FPI) y la entropía modificada de partición (PME). Se realizó un mapeo de los sub-rodales con el método de interpolación Kriging, y se estimó un modelo de regresión lineal para determinar las diferencias significativas del volumen de madera ($m^3 \cdot ha^{-1}$) entre sub-rodales. Las medidas de validez funcional implican la división de los rodales en cuatro a seis sub-rodales, lo cual es soportado con la coherencia del mapeo de los sub-rodales y con los resultados de los análisis de regresión. Los resultados del estudio indican la utilidad potencial del método fuzzy k-means para definir sub-rodales homogéneos para una silvicultura de precisión.

LITERATURA CITADA

- Australian Centre for Precision Agriculture. 2000. FuzMe, fuzzy k-means with Extragrados Program. <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/htm>
- Bezdek, J.C. 1974. Numerical taxonomy with fuzzy sets. *J. Math. Biol.* 1: 57-71.
- Burrough, P.A. and R.A. McDonnell. 1998. *Principles of Geographical Information*

- Systems. Information Systems and Geostatistics. Oxford University Press. 346 p.
- Burrough, P.A., R.A. MacMillan and W. van Deursen. 1992. Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. *Journal of Soil Science* 43: 193-210.
- Dunn, J.C. 1974. A fuzzy relative of the isodata process and its use in detecting compact, well-separated clusters. *Journal of Cybernetics* 3: 22-57.
- Fleming, K.L. and D.G. Westfall. 2000. Evaluating Farmer Defined Management Zone Maps for Variable Rate Fertilizer Application. *Precision Agriculture* 2: 201-215
- Fridgen, J.J., C.W. Fraisse, N.R. Kitchen and K.A. Sudduth. 2000. Delineation and analysis of the site-specific management zones. *Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry*, Lake Buena Vista, Florida. 10 p.
- Guler, C., G. Thyne, J.E. Mccray and A.K. Turner. 2001. Evaluation of the Graphical and Multivariate Statistical Methods used for Classification of Water-chemistry data. *GSA Annual Meeting*. 12 p.
- McBratney, A.B. and J.J. Gruijter, 1992. A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragrades. *Journal of Soil Science* 43: 159-175.
- Murray, A.T. and S. Snyder. 2000. Spatial modeling in forest management and natural resource planning. *Forest Science* 46(2): 153-156.
- Ortega, R. 1998. Manejo Sitio Específico: Aplicabilidad a Plantaciones Forestales. *X Silvotecnía Concepción*, Chile. 14 p.
- Ortega, R. y L. Flores. 1999. Agricultura de Precisión. In *Agricultura de Precisión: Introducción al manejo Sitio-Específico*. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quillamapu. Chillán, Chile. p. 13-46.
- Pierce, F. and P. Nowak. 1999. Aspects of Precision Agriculture. *Advances in Agronomy* 67: 1-85.
- Precision Forestry Cooperative. 2000. Web page of the Precision Forestry Cooperative, Universidad de Washington, College of Forest Resource. <<http://www.cfr.washington.edu/research.pfc/>>
- Ruspini, E.H. 1969. A new approach to clustering. *Information and Control* 15: 22-32.
- Schreier, J. F., R.J. O'Hara Hines and K.M. Kovacs. 1999. Classification of Drive Profiles: A Comparison of Statistical Clustering Techniques and Unsupervised Artificial Neural Networks. *JABES* 3(4):383-404.
- Triantafyllis, J., W.T. Ward, I.O.A. Odeh and A.B. McBratney. 2001. Creation and Interpolation of Continuous Soil Layer Classes in the Lower Namoi Valley. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 403-413.
- Van Alphen, B.J. and J.J. Stoorvogel. 2000. A Functional Approach to Soil Characterization in Support of Precision Agriculture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1706-1713.
- Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8: 338-353.
- Zhu, A.X., B. Hudson, J. Burt, K. Lubich. and D. Simonson. 2001. Soil Mapping Using GIS, Expert Knowledge, and Fuzzy Logic. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1463-1472.