

APTITUD DE ÁREAS PARA PLANTACIONES DE EUCALIPTO EN OAXACA Y VERACRUZ: PROCESO DE ANÁLISIS JERARQUIZADO VS. ÁLGEBRA BOOLEANA

AREA APTITUDE FOR EUCALYPTUS PLANTATIONS ANALYTIC HIERARCHY PROCESS VS. BOOLEAN ALGEBRA

Carina Edith Delgado Caballero ¹, José René Valdez Lazalde ¹, Aurelio Manuel Fierros González ¹, Héctor Manuel de los Santos Posadas ¹
y Armando Gómez Guerrero ¹

RESUMEN

Este estudio reporta una zonificación de áreas para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en los límites de los estados de Oaxaca y Veracruz. Se compararon los resultados obtenidos mediante las técnicas de evaluación multicriterio espacial conocidas como álgebra booleana y el Proceso de Análisis Jerarquizado (AHP, por sus siglas en inglés) implementadas en un ambiente de sistemas de información geográfica (SIG) para identificar niveles de aptitud de la tierra. Los criterios de evaluación fueron seleccionados con base en la influencia de los factores ecológicos sobre el desarrollo de las especies y la disponibilidad de información cartográfica de escala adecuada. Se utilizaron variables discretas como la precipitación y la temperatura; profundidad, textura y pH del suelo, y variables continuas como la altitud y la pendiente. La estandarización de los criterios (variables) se realizó a través de técnicas de transición gradual (fuzzy). La importancia relativa de los criterios (pesos) considerados fue calculada a partir de información proporcionada por expertos. Los resultados indican que el área estudiada tiene potencial para el establecimiento de las especies consideradas, pues más del 50% de ésta es muy apta para *E. urophylla*, mientras que para *E. grandis* la aptitud se distribuye en 25% alta, 25% media y 50% baja.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, evaluación multicriterio espacial, lógica borrosa, proceso de análisis jerarquizado (AHP), sistema de información geográfica.

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2008.

Fecha de aceptación: 12 de abril de 2010.

ABSTRACT

A land zoning for the establishment of commercial forest plantations of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla* in the limits of the Mexican states of Oaxaca and Veracruz is reported. Results from the spatial multicriteria evaluation techniques known as boolean algebra and the Analytic Hierarchy Process (AHP), implemented in a SIG environment to identify land suitability levels, are compared. The evaluation criteria were selected with base on the influence (weight) of the ecological requirements of the species and the availability of adequate scale cartographic information. Discret variables such as precipitation, temperature; soil depth, soil texture, soil pH, and continuous such as altitude and slope were used. All criteria (variables) were standardized using fuzzy logic membership functions. The relative importance of the criteria (weights) were calculated from expert's opinions. Results indicate that the studied area has potential for the establishment of plantations with the species considered. More than 50% of the area is very suitable to establish *E. urophylla*, whereas for *E. grandis* the suitability is distributed as follows: 25% high, 25% medium and 50% low.

Key words: *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, multicriteria evaluation, fuzzy logic, analytic hierarchy process (AHP), geographic information system.

INTRODUCCIÓN

La zonificación de áreas para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales (PFC) de una especie en particular es un aspecto importante, ya que las consecuencias sociales y económicas derivadas de una mala selección de sitios destinados al establecimiento de plantaciones pueden resultar inaceptable para la sociedad e inversionistas del ramo.

En México, la mayoría de los estudios de aptitud forestal se realizan mediante técnicas cartográficas simples (álgebra booleana) (Barcnas, 2002; Meza, 2003; Hernández *et al.*, 2007), que consisten, básicamente, en sobreponer capas de información espacial (mapas temáticos) que representan por un lado, las características biofísicas existentes en el área, y por otro, los requerimientos climáticos y edáficos de la especie de interés, asumiendo que influyen de igual manera en la producción. Bajo este método se clasifican como áreas con aptitud aquellas superficies que poseen las características consideradas como óptimas para el desarrollo de una especie en particular. Sin embargo, el álgebra booleana tiene la desventaja de no identificar los diferentes niveles de aptitud espacial en el área de interés, situación que no es deseable cuando se requiere planificar programas o actividades con recursos limitados.

En una situación real, no todos los criterios influyen de igual manera en el éxito y productividad de una plantación, o por el contrario, pueden contribuir en diferente grado. Una alternativa metodológica para este tipo de estudios, que incorpora factores de ponderación para cada criterio considerado, es el Análisis de Evaluación Multicriterio, el cual tiene como propósito investigar un número de alternativas mediante criterios múltiples con

¹ Postgrado Forestal, Colegio de Postgraduados. Correo-e: valdez@colpos.mx

la finalidad de auxiliar a los tomadores de decisiones a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar alternativas de uso (Malczewski, 1999), o como en este caso, para identificar los diferentes grados de aptitud de un área para un fin específico. Los grados relativos de contribución se analizaron mediante la comparación del método booleano tradicional y el Proceso de Análisis Jerarquizado AHP (Saaty, 1980), adicionando técnicas Fuzzy (efectos confundidos).

El estudio se llevó a cabo en el noreste del estado de Oaxaca y el sureste de Veracruz, y respondió a una necesidad de la empresa Plantaciones de Tehuantepec S. A. de C. V. (PLANTEH), que está desarrollando un proyecto de plantaciones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden y *E. urophylla* S. T. Blake para la producción de materias primas celulósicas y maderables.

Aunque es conocido que esta región posee condiciones ecológicas apropiadas para plantaciones, la localización de los mejores lugares para su establecimiento es una estrategia necesaria para dirigir la contratación de terrenos y maximizar sus probabilidades de éxito, con lo que se incrementa la expectativa de los beneficios económicos y disminuyen los riesgos del propietario.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y descripción del área de estudio

El estudio se hizo en los terrenos plantados por la empresa PLANTEH y una zona circundante de 862,200 ha ubicada entre las coordenadas 17°42' y 17°24' de latitud norte y los 95°30' y 95°17' de longitud oeste. Comprende los municipios San Juan Guichicovi, Santiago Yaveo, San Juan Cotzocón, San Juan Mazatlán y Matías Romero del estado de Oaxaca; y los municipios Playa Vicente, Juan Rodríguez Clara, Santiago Sochiapan, San Juan Evangelista, Sayula de Alemán, Texistepec y Jesús Carranza del estado de Veracruz (Figura 1).

Clima.- El clima predominante es del tipo cálido húmedo (Am) y cálido subhúmedo (Aw), de acuerdo con la clasificación de García (1987). La temperatura promedio anual es de 24 a 28°C. La temperatura mínima varía de 14 a 20°C. La precipitación media anual varía de los 2,000 a los 3,000 mm en el terreno con clima (Am) y de 800 a 2,000 mm en el predio con clima (Aw). Las condiciones climáticas son ideales para el cultivo de árboles. La altura sobre el nivel del mar varía de 0 hasta 400 m (CONABIO, 1998)

Suelos.- Las unidades de suelo principales en la región son los Cambisoles, Acrisoles, Luvisoles, Gleysoles y Regosoles. En general son de textura franca o arcillosa con profundidad variable. El pH varía de 3.5 a 7.3 en los terrenos plantados (SEMARNAT, 2002).

Fisiografía.- La región se conforma por planicies y lomeríos con pendientes que no rebasan 35%, por lo que existe la posibilidad de extender las plantaciones a tierras con pendientes planas. Las existentes se han desempeñado bien hasta una altitud de 1,200 y una latitud de 27° sur, con un incremento en el límite de la altitud de 50 m por cada grado que la latitud decrece, o una reducción similar por cada grado en que la latitud aumenta (Schönau *et al.*, 1984).

Hidrología.- El área de estudio está localizada dentro de las cuencas de los ríos Papaloapan y Coatzacoalcos, mismo que escurre por el sureste del área, dentro de los cuales corre, además, el Trinidad que se extiende por la parte central.

Requerimientos ecológicos de *Eucalyptus grandis*

Clima.- *E. grandis* adquiere su mejor desarrollo en climas húmedos subtropicales o templados cálidos con lluvia concentrada en el verano, pero ha sido plantada con buenos resultados en zonas con una amplia gama de intervalos en la estación seca. Si bien la precipitación mínima está afectada por tres factores, tales como la evapotranspiración y el tipo de suelo, algunos autores especifican un mínimo de 750 mm (FAO, 1981; Booth *et al.*, 1988; Booth y Pryor, 1991) para la especie y una máxima de 4,000 mm, pero entre los 1,000 y los 1,500 mm la especie alcanza su mejor crecimiento (FAO, 2000). El intervalo óptimo de temperatura media anual oscila entre los 24 y 25°C. La experiencia en África indica que la temperatura media del mes más frío no debe ser menor a 7°C y la mínima diaria no menor de 5°C (Schönau *et al.*, 1984), la temperatura máxima promedio aceptable para la especie varía de 30 a 35°C (FAO, 2000).

Suelos.- Requiere suelos con profundidad >1 m, pero se desarrolla exitosamente en profundidades de 50 a 100 m (FAO, 1981); las texturas son franco-arcillosas con buen drenaje, aunque es posible obtener buenos resultados sobre suelos con texturas más gruesas. El pH óptimo varía de 5.5 a 6.5 y no debe ser menor de 5 ni mayor de 7.5 (FAO, 1981).

Topografía.- El mejor desempeño de las plantaciones se da en una altitud de 0 a 600 m y con un límite máximo de hasta 2,700 m (FAO, 2000). Los lugares óptimos son tierras planas y pendientes inferiores de los valles menores al 35% (FAO, 1981).

Requerimientos ecológicos de *Eucalyptus urophylla*

Clima.- *E. urophylla* promete mucho en áreas húmedas o subhúmedas, tropicales o subtropicales. Las plantaciones se desarrollan mejor en zonas con un rango de precipitación media anual entre 1,300 2,500 mm y una estación seca de 1 a 5 meses en la época más fría del año. Pueden llegar a tener un desarrollo regular con precipitaciones medias de hasta 700 mm y en un máximo de 4,000 mm. La temperatura media anual óptima varía de 24 a 35°C, la media óptima del más frío es de 10°, sin bajar de los 5° y las del mes más caliente varían de 32 a 35°C (FAO, 1981; FAO, 2000).

Suelo.- Su mejor crecimiento se da en suelos bien drenados con profundidad >1 m, pero puede crecer bien en suelos con profundidades de 50 a 100 cm. La textura óptima es la media fina, aunque también en texturas más gruesas, las tallas son menores. El pH óptimo debe estar entre 5.5 y 6.5 y no debe ser menor de 5 ni mayor de 7.5 (FAO, 1981; FAO, 2000).

Topografía.- Los mejores resultados se han logrado en altitudes de 500 a 1,400 m (FAO, 1981), pero pueden funcionar entre 0 y 2,700 m (FAO, 2000). Los lugares óptimos son tierras planas y con pendientes de los valles inferiores a 30% (FAO, 1981).

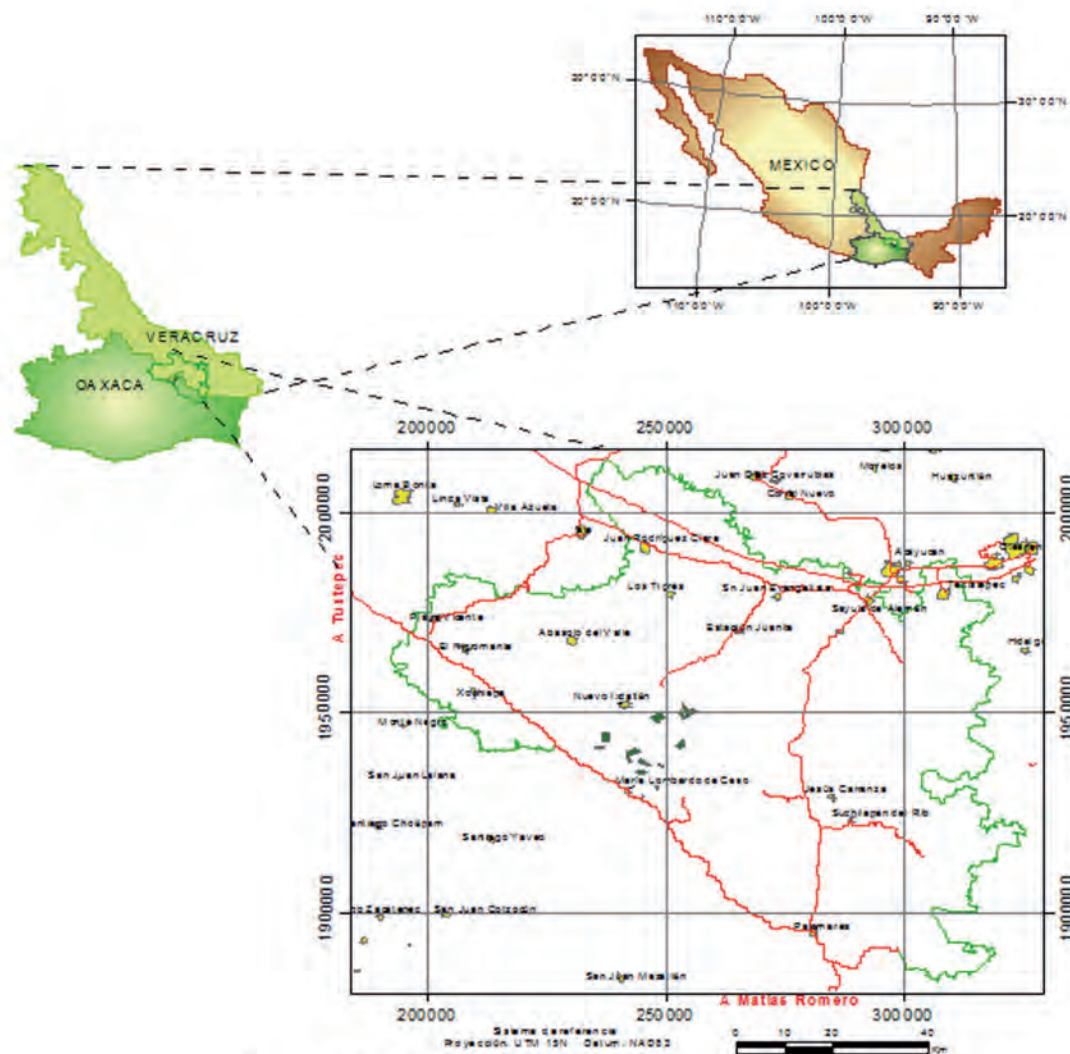


Figura 1. Localización del área de estudio.

Identificación de las áreas con aptitud AHP

La identificación de áreas con aptitud para el establecimiento de plantaciones de eucalipto se fundamenta en los requerimientos ecológicos de la especie (denominados "criterios"), los principales: clima, suelo y topografía, que son los más relevantes, pero no los únicos; a su vez se clasifican en subcriterios, de los cuales los más importantes son: precipitación (FAO, 1958), temperatura media, máxima y mínima (Prado y Barros 1989; Spurr y Barnes, 1980), pH del suelo (Fassbender, 1985), textura (Pritchett, 1990), pendiente (Spurr y Barnes, 1980; Pritchett, 1990).

Una vez identificados los criterios y subcriterios se recopiló la información cartográfica y se homogeneizó en cuanto a la proyección y Datum para poder realizar la modelación cartográfica. Adicionalmente, a los criterios categóricos (vectoriales) se les asignó el valor medio de clase y se realizó una conversión de formato vectorial a raster. Bajo un enfoque de evaluación multicriterio espacial como la que se reporta, los criterios se representan mediante mapas (mapas criterio). Se usaron los siguientes: Precipitación, escala 1:250 000 (CONABIO, 1998); temperatura media anual, temperaturas máximas y mínimas promedio (CONABIO, 1998), escala 1:1 000 000; profundidad y textura del suelo obtenidas a partir de las

fases físicas reportadas en la carta edafológica escala 1:250 000 (CONABIO, 1998). Se definieron tres clases de profundidad: de 0 a 50 cm (fases lítica, gravosa y pedregosa), de 50 a 100 cm (fase lítica profunda) y >100 cm (suelos sin fase). pH del suelo (SEMARNAT, 2002) escala 1:250 000. La altitud y la pendiente se obtuvieron del modelo de elevación digital denominado "Continuo de Elevaciones Mexicano" basado en la cartografía topográfica escala 1:50 000 (INEGI, 2005).

Identificación de restricciones

Contrario a los criterios, una restricción es una condición natural o humana que limita de manera total a la actividad de interés. Para eximir del análisis las áreas no aptas debido a estas razones se generaron mapas-restricción a partir de los caminos, los cauces de ríos, los cuerpos de agua y las áreas con cubierta vegetal arbolada.

A este tipo de áreas se les asignó un valor de 0 (restricción), al resto un valor 1 y finalmente se hizo una intersección booleana para conjuntarlas en un mapa único.

Los caminos y cauces de los ríos fueron digitalizados de la carta topográfica E15-7 escala 1:250 000, corroborados y detallados con

imágenes Landsat de 2000 y 2001 (GLCF, sf). El área por discriminar por los caminos se estableció como una zona de amortiguamiento (buffer) de 50 m. Los ríos y arroyos en el área fueron discriminados con un buffer de 100 m. El mapa de uso de suelo se obtuvo de la cartografía asociada al Inventario Nacional Forestal escala 1:250 000 (SEMARNAP, 2000) modificándose cuando fue necesario en función de lo observado en las imágenes Landsat y en los recorridos de campo.

Se definieron y segregaron como áreas factibles aquellas identificadas con uso del suelo agricultura de temporal o pastizal. El resto de la superficie (agricultura de riego, bosque, selva, asentamiento humano, cuerpo de agua, etc.) se manejó como área con restricción. Se eliminaron también los predios con pendiente mayor a 30% debido a que este valor es el máximo considerado para el uso de maquinaria (García *et al.*, 2001), condición que favorece la productividad de las plantaciones forestales.

Evaluación multicriterio espacial

La evaluación para generar los niveles de aptitud en el área de estudio se realizó a través de la combinación del "Proceso de análisis Jerarquizado" (AHP–Analytical Hierarchy Process), de técnicas fuzzy y el método de Sumatoria Lineal Jerarquizada. La estructura jerárquica de los criterios y subcriterios utilizados se presentan en la Figura 2.

Estandarización de los criterios de evaluación

Dado que los mapas criterio poseen diferentes unidades de medida se les transformó a unidades comparables. Para ello se definieron funciones de pertenencia o membresía mediante la técnica conocida como fuzzy, debido a que permite la estandarización tanto de los mapas continuos como de los categóricos usados en este estudio. Las funciones de pertenencia se generaron a partir de los requerimientos de cada especie, de acuerdo con el tipo de variable (continua o discreta); la respuesta de la especie a cada uno de los factores de estratificación y al rango de valores existente de los criterios en el área de estudio. Se asignó el valor de 1 a los valores óptimos para el desarrollo de la especie en cada criterio y el valor de 0 a los valores más distantes de los criterios de evaluación (cuadros 1 y 2).

Obtención de los pesos (W)

La importancia relativa (peso) de los criterios fue evaluada de acuerdo a la opinión de 11 expertos en plantaciones forestales comerciales en México (Olivas *et al.*, 2007). De acuerdo con estos autores, los pesos de las matrices construidas y su consistencia se calcularon en el módulo WEIGHT del software IDRISI (Clark Labs, 2003). Para la asignación de pesos a cada criterio se promediaron los resultados de las matrices que arrojaron un índice de consistencia mayor a 0.1.

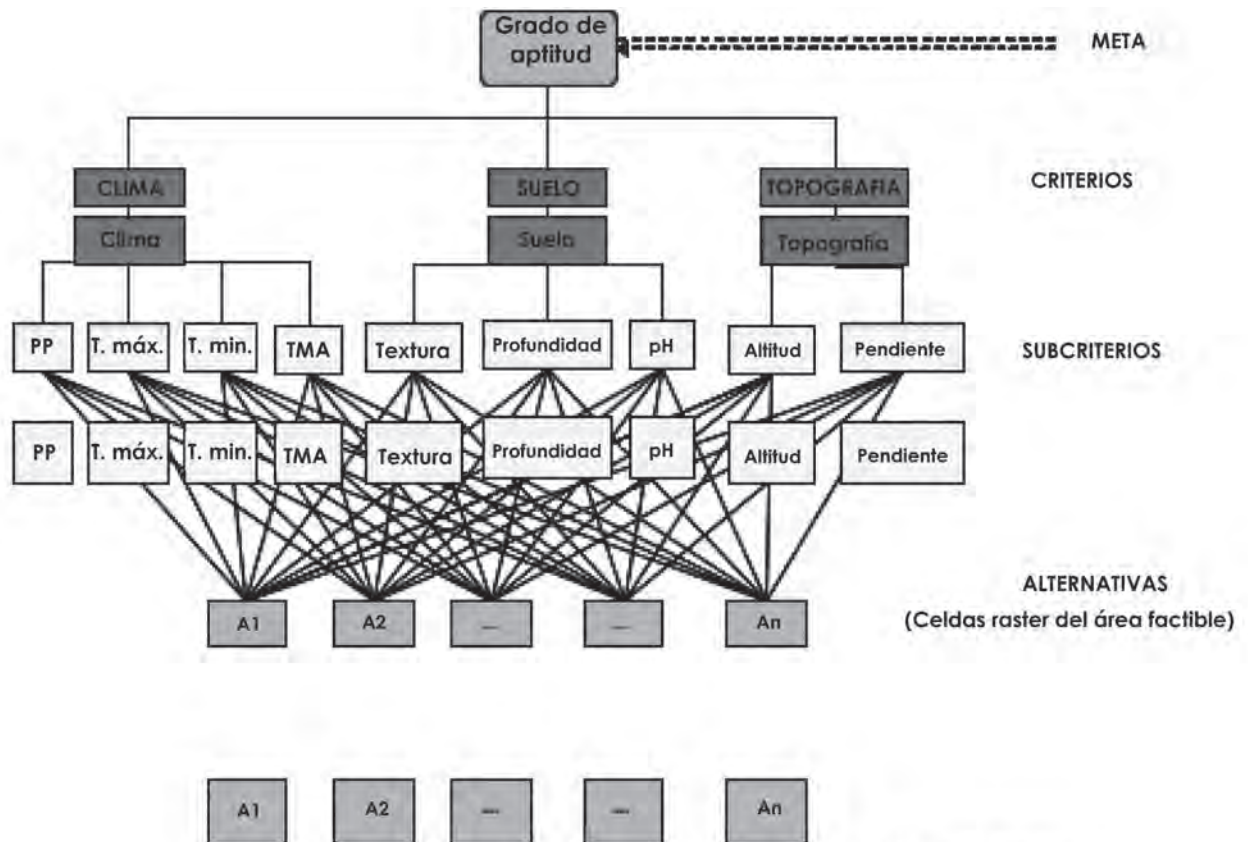
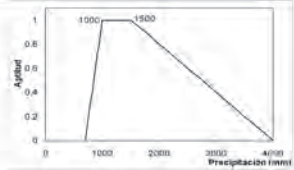
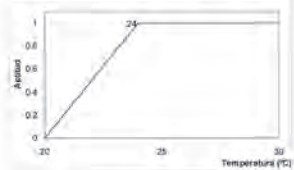
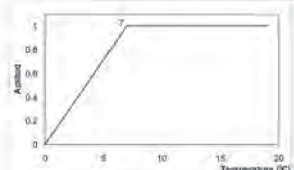
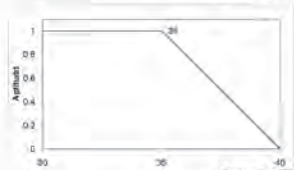
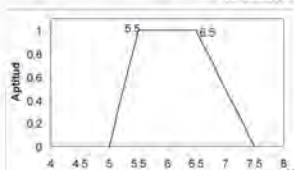
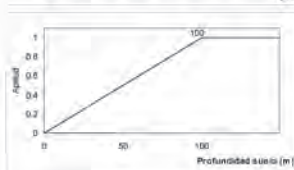
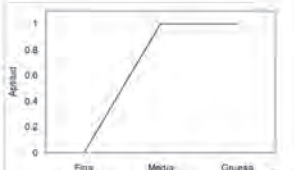
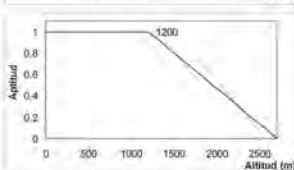
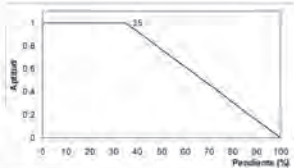
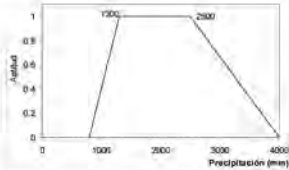
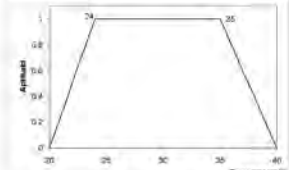

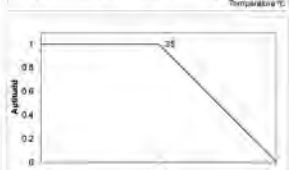
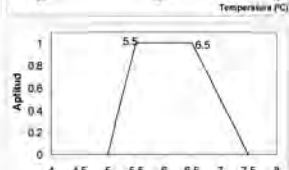
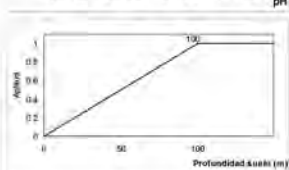
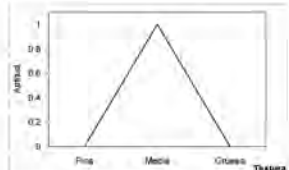
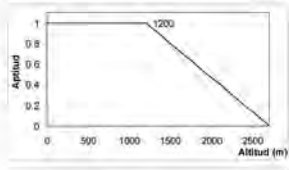
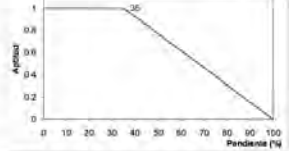


Figura 2. Estructura jerárquica de los criterios y subcriterios considerados en el estudio.

Cuadro 1. Funciones de pertenencia de los requerimientos del *Eucalyptus grandis* respecto a los criterios ecológicos del área de estudio.

Criterio	Valores óptimos		Intervalos de los requerimientos		Función de pertenencia
	mín.	máx.	mín.	máx.	
Precipitación mm	1.000	1.500	700	4.000	
Temperatura media anual °C	24	35	20		
Temperatura mínima °C	>7		0		
Temperatura máxima °C	30	35		40	
pH	5.5	6.5	5.0	7.5	
Profundidad del suelo	>100		0	>100	
Textura	Media		Fina	Gruesa	
Altitud msnm	0	600		2.700	
Pendiente %	<35			100	

Cuadro 2. Funciones de pertenencia de los requerimientos del *Eucalyptus urophylla* respecto a los criterios ecológicos del área de estudio.

Criterio	Valores óptimos		Rangos de los requerimientos		Función de pertenencia
	Min	Máx	Min	Máx	
Precipitación mm	1,300	2,500	900	2,750	
Temperatura media anual °C	24	35	20	40	
Temperatura mín. °C	>10		5		
Temperatura máx. °C	32	35		40	
pH	5.5	6.5	5.0	7.5	
Profundidad del suelo	>100		0	>100	
Textura	Media		Fina	Gruesa	
Altitud msnm	0	1,200		2,700	
Pendiente %	< 35%			100	

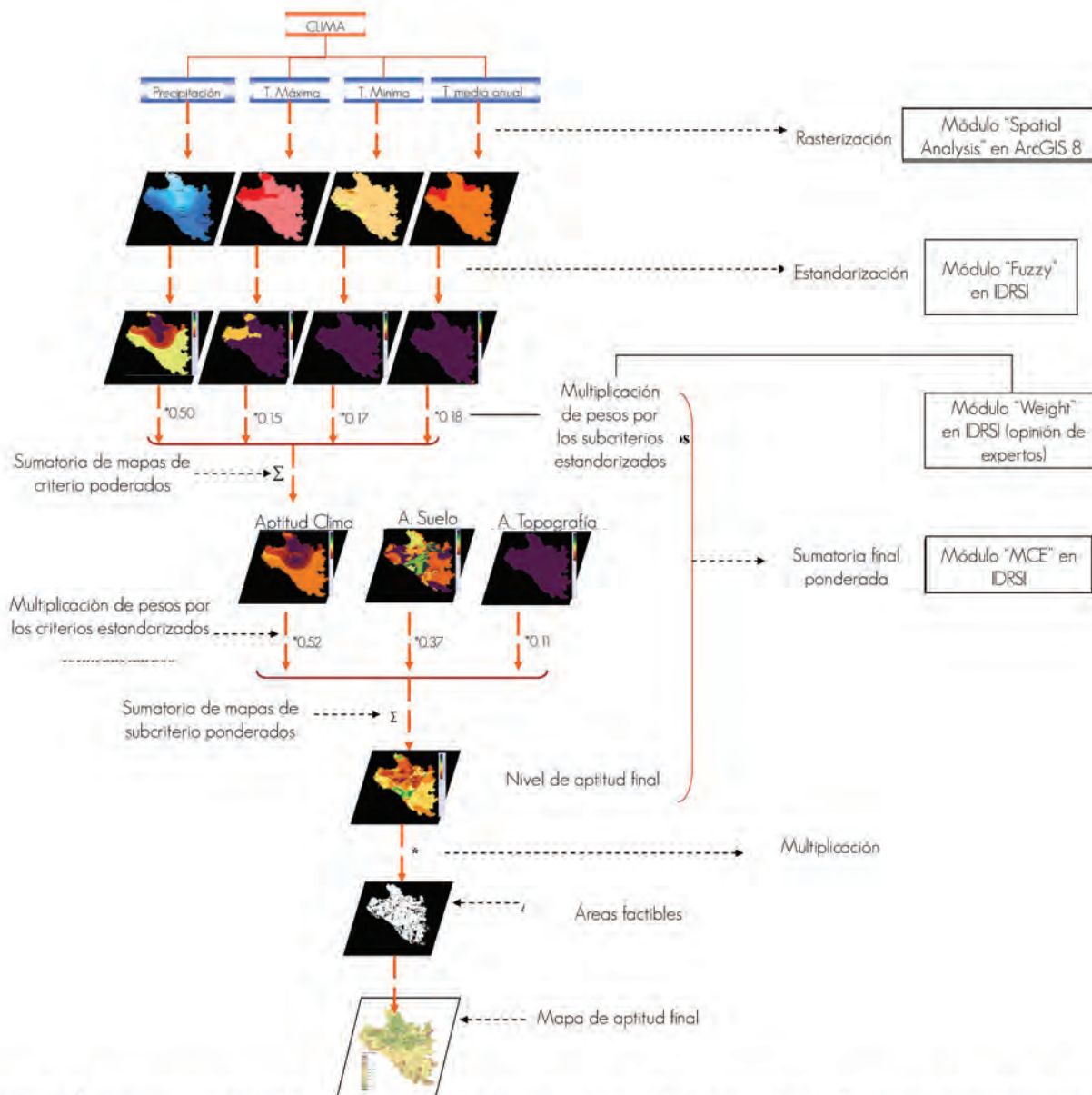


Figura 3. Esquema metodológico que muestra la secuencia de evaluación y utilización del método de evaluación multicriterio conocido como AHP

Generación del mapa de aptitud

Una vez asignados los valores de importancia de cada criterio se procedió a su agregación para generar el mapa de aptitud mediante la sumatoria lineal jerarquizada implementada en el módulo MCE de IDRISI (Clark Labs, 2003), la cual consiste en la multiplicación de cada mapa criterio estandarizado por su peso correspondiente, seguida de la sumatoria de todos los criterios y la ponderación de los valores obtenidos en el mapa (Figura 3). El de zonificación final se generó multiplicando el de áreas factibles por el de aptitud final para discriminar las áreas no aptas.

Identificación de áreas con aptitud Álgebra booleana

Para la aplicación de esta metodología se utilizó la misma base de datos (mapas) que en el método de evaluación multicriterio AHP. Los requerimientos óptimos de cada criterio definidos para cada especie sirvieron para clasificar los mapas, discriminando las

áreas que no coincidieran con ellos. Cada mapa se rasterizó y se reclasificó con valores de 1 para las áreas aptas y 0 para las no aptas. Luego se multiplicó cada cobertura entre sí incluyendo la de áreas factibles, de lo que resultó el mapa de aptitud final.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los intervalos de aptitud obtenidos para el área factible fueron de 0.39 a 1 para *E. grandis* y 0.59 a 1 para *E. urophylla*. Para facilitar la interpretación de los datos, se clasificaron las áreas en tres posibilidades de aptitud: >0 a 0.7 baja, >0.7 a 0.9 media y >0.9 a 1 alta. Las figuras 4a y 5a muestran la ubicación y clasificación de los niveles de aptitud para *E. grandis* y *E. urophylla*, respectivamente.

En las figuras 4b y 5b se presenta la clasificación de la aptitud de la tierra para las dos especies por medio de la metodología booleana convencional.

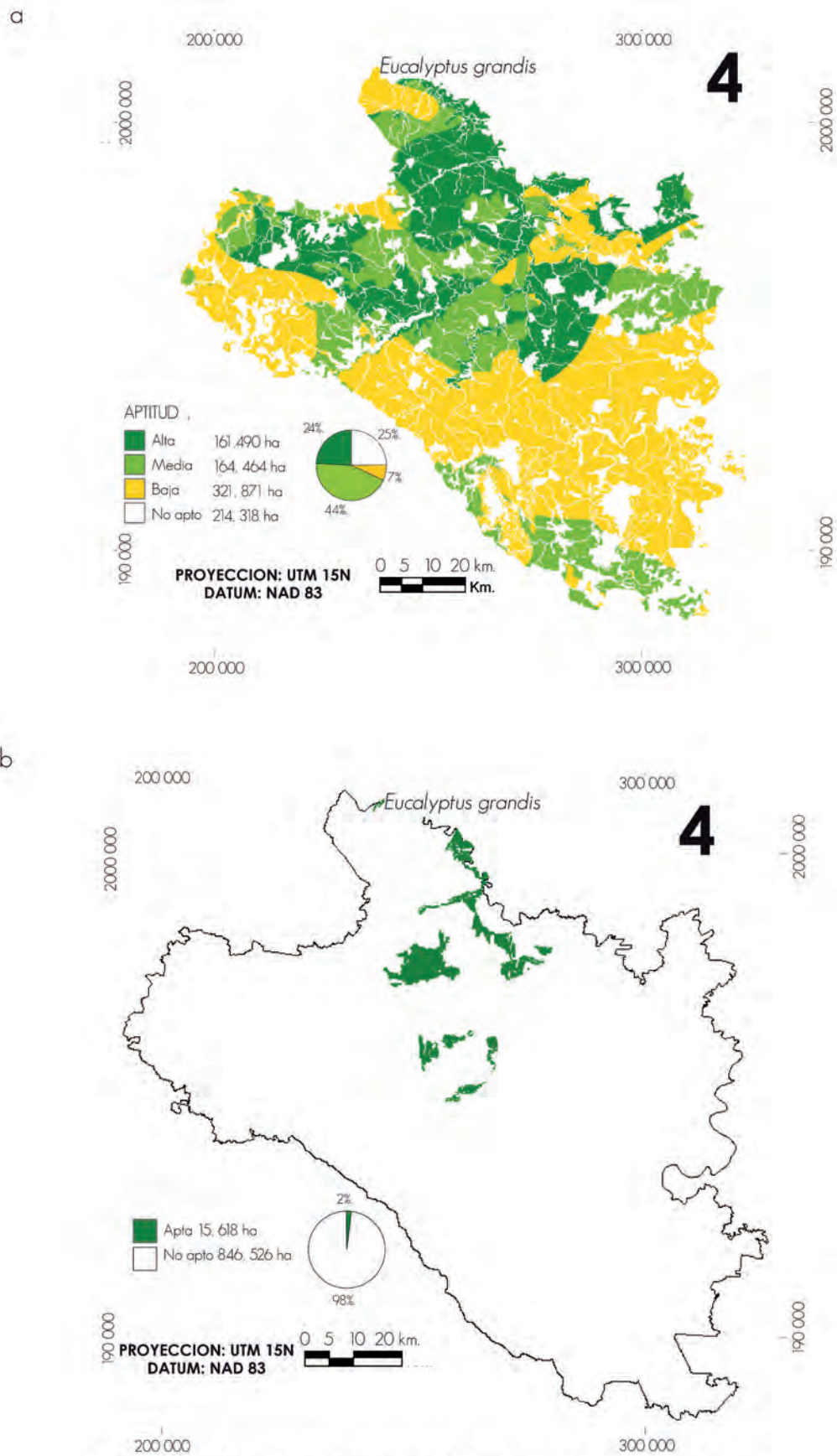


Figura 4. Zonificación y distribución de superficies con aptitud para *Eucalyptus grandis*: a) Evaluación multicriterio (AHP-Fuzzy), b) Álgebra booleana.

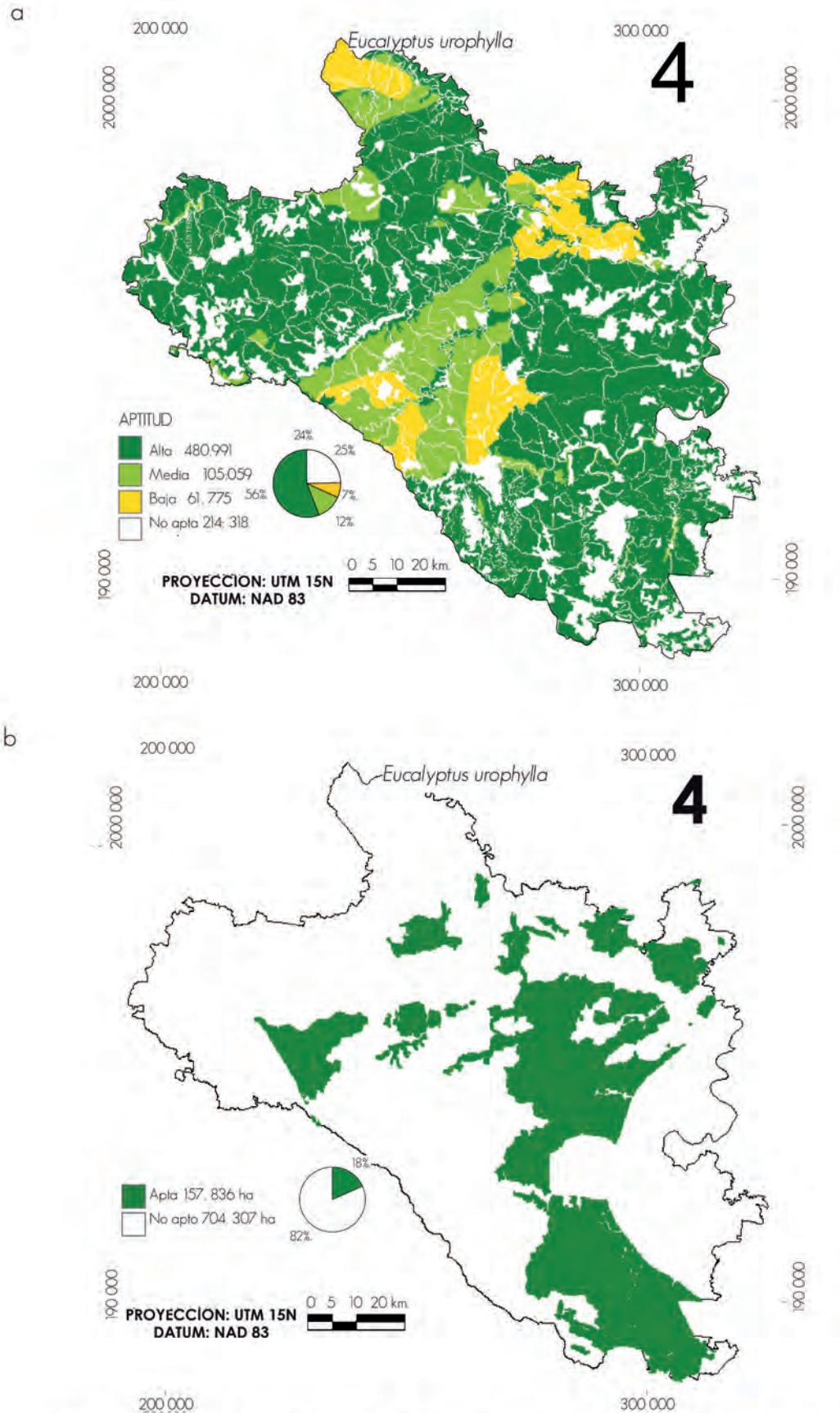


Figura 5. Zonificación y distribución de superficies con aptitud para *Eucalyptus urophylla*: a) Evaluación multicriterio (AHP-Fuzzy), b) Álgebra booleana.

Al comprar las figuras 4a y 4b se observa que las áreas aptas obtenidas a través de este método forman parte de las áreas clasificadas como de aptitud alta con el método AHP-Fuzzy. Esto se atribuye a que ambas metodologías incluyen los mismos criterios de evaluación. Sin embargo, con la primera (booleana) sólo se cuantificaron 15,618 ha consideradas como aptas para el establecimiento de plantaciones de *E. grandis*, mientras que con AHP-Fuzzy se obtuvo un área de 161,490 ha. Esto se debe, en esencia, al más reducido intervalo de los requerimientos (sólo el óptimo) considerado en la metodología booleana.

En la evaluación de áreas para *E. urophylla* ocurrió lo mismo: con álgebra booleana se clasificaron 157,836 ha como áreas aptas, mientras que mediante AHP-Fuzzy este valor se incrementó a 480,991 ha, dentro de la categoría "Aptitud Alta". Burrough *et al.* (1989) señalan que al usar álgebra booleana para el análisis de aptitud de la tierra hay una pérdida notable de información, lo cual es consistente con lo aquí descrito.

Las áreas con aptitud media y baja son discriminadas por esta metodología debido a que las áreas seleccionadas deben reunir los requerimientos de todos los criterios de evaluación de manera óptima.

A pesar de la separación en clases de aptitud, los resultados no muestran una transición gradual. Como mencionan García *et al.* (2004), el enfoque Fuzzy permite una mejor representación de la variabilidad espacial de información cartográfica continua; sin embargo, en este estudio no fue posible detectarlo debido a que la mayoría de la información utilizada es categórica y para el caso de la altitud y la pendiente (cartografía continua), los datos observados están en los intervalos óptimos de los requerimientos; por lo tanto, se clasificaron con el máximo de aptitud.

La distribución de las superficies por clase de aptitud y municipio se muestran en el Cuadro 3. Para *E. urophylla* la mayor parte de la superficie está clasificada como apta, al contrario que *E. grandis*; sin embargo, hay una buena porción de terreno identificado como de aptitud alta y media con casi el 50% del área factible. Las de aptitud alta para *E. grandis* se distribuyen principalmente en los municipios del estado de Veracruz, siendo San Juan Evangelista el más notorio; en el caso de *E. urophylla*, Jesús Carranza es el municipio más destacado. Es necesario mencionar que estos resultados no han sido verificados de forma estricta en campo; sin embargo, una evaluación cualitativa con base en los recorridos realizados por la región apoya su validez y utilidad.

Cuadro 3. Superficies de grado de aptitud por método y municipio (ha).

	<i>Eucalyptus grandis</i>			<i>Eucalyptus urophylla</i>		
	Alta	Media	Baja	Alta	Media	Baja
Zonificación Booleana	15,617			157,835		
Zonificación AHP-Fuzzy	161,490	164,464	321,870	480,990	105,059	61,775
Zonificación AHP-Fuzzy/ municipio						
Santiago Yaveo	3,368	19,368	24,666	5,062	36,104	6,237
San Juan Mazatlán	0	3,781	2,992	6,480	293	0
Matías Romero	0	26,382	31,953	56,803	1,519	13
San Juan Guichigovi	0	4,165	4,217	3,160	5,190	31
San Juan Cotozocon	576	2,382	37,236	3,002	20,413	16,779
Texistepec, Ver.	8,108	11,851	7,960	27,423	327	168
Santiago Sochiapan	0	5,656	19,698	23,365	1,989	0
Sayula de Alemán	16,390	11,524	24,345	41,414	566	10,279
Playa Vicente	32,328	27,964	28,368	87,368	1,292	0
San Juan Evangelista	52,007	29,814	17,786	64,997	20,487	14,123
Juan Rodríguez Clara	47,088	21,489	15,879	53,940	19,070	11,446
Jesús Carranza	1,587	0	106,785	102,695	2,941	2,736

Por el contrario, la asignación diferenciada de pesos a cada uno de los criterios de evaluación en la metodología AHP permite escoger áreas que, aunque no reúnen la totalidad las demandas de un factor, pero porque sus cifras sean muy cercanas a los límites óptimos, o porque éste sea poco relevante de acuerdo con su valor de ponderación, no impactan de forma significativa en la determinación de la aptitud total.

La diferencia más obvia entre las figuras 4a y 4b, y entre la 5a y 5b es que con la técnica AHP-Fuzzy es posible clasificar casi en su totalidad el área de influencia, mientras que con la metodología booleana, más del 80% de la superficie es no apta.

En cuanto a la superficie clasificada por tipo de metodología resultó que mediante el álgebra booleana se calcularon 15,617.8 ha para *E. grandis* y 157,835 ha para *E. urophylla*, mismas que son bajas al compararlas a través de AHP-Fuzzy.

CONCLUSIONES


Este estudio confirma que la evaluación multicriterio, implementada en un ambiente de SIG combinando métodos como AHP, Lógica Fuzzy y la sumatoria lineal ponderada, es adecuada para evaluar la aptitud de las tierras integrando criterios como clima, suelo y topografía. La delimitación y clasificación de áreas para establecer plantaciones

de *E. grandis* y *E. urophylla* mediante el multicriterio espacial tiene ventajas sobre el álgebra booleana, ya que a diferencia de esta última, permite categorizar la aptitud (definir clases) y con ello la focalización y la priorización del uso de recursos para llevar a cabo los proyectos de este tipo e identificando, además, áreas con características similares a las óptimas, en donde las especies de interés pueden tener buenos crecimientos.

Las técnicas multicriterio aplicadas en este estudio son herramientas prácticas, pero la calidad de los resultados dependen en gran medida de la información cartográfica, la opinión de expertos y de las funciones de pertenencia basada en los requerimientos de la especie, derivadas de la revisión de literatura, tanto del lugar de origen de las especies, como de lugares en donde se ha tenido éxito con plantaciones.

Hay terreno suficiente con aptitud alta para cubrir la meta de 20,000 ha de la empresa PLANTEH; sin embargo, es necesario tener presente que este estudio sólo considera los requerimientos de la especie en el análisis, por lo que es necesario complementarlo con estudios de factibilidad económica y social.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero recibido del Fondo Sectorial CONAFOR-CONACYT a través del proyecto 2003-CO3-9925 "Captura de carbono, biodiversidad, productividad y zonificación productiva de plantaciones comerciales en los límites de Oaxaca y Veracruz". También se reconoce la disposición de la empresa Plantaciones de Tehuantepec, S. A. de C. V. por las facilidades otorgadas para el desarrollo de la investigación. 

REFERENCIAS

- Barcenas, A. P. 2002. Determinación de zonas potenciales para el establecimiento de plantaciones de pitahaya (*Hylocereus* spp.). Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de Méx. México. 145 p.
- Booth, T. H. and L. D. Pryor. 1991. Climatic requirements of some commercially important eucalypt species. *Forest Ecology and Management* 43: 26-31.
- Booth, T. H., H. A. Nix, M. F. Hutchinson and T. Jovanovic. 1988. Niche analysis and tree species introduction. *Forest Ecology and Management* 23: 47-59.
- Burrough, P. A. 1989. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Journal of Soil Science* 40:477-492.
- Clark Labs. 2003. IDRISI version 14.0 Kilimanjaro. Geographic Analysis and Image Processing Software. Worcester, MA. USA. 290 p.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. Obtención de metadatos y cartografía en línea: <http://conabioweb.conabio.gob.mx/metacarto/metadatos.pl>. (junio de 2006).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1958. Elección de especies arbóreas para plantación. Cuadernos de Fomento Forestal N° 13. Roma. Italia. 100 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. Roma, Italia. 723 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2000. The crop environmental requirements database (Ecocrop). In: Plant Production and Protection Division of FAO (AGPC). Versión Internet <http://ecocrop.fao.org>. (julio de 2006)
- Fassbender, L. 1985. Química de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 125 p.
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4ª. Ed. México, D. F. México. 217 p.
- García N., H., D. R. García, R. Moreno S., J. López B. y M. de L. Villers R. 2001. Enfoques Fuzzy y Booleano convencional para clasificar la aptitud agrícola de las tierras. *Agricultura Técnica en México* 27(2):107-118.
- García N., H., R. Moreno S., J. López B., M. de L. Villers R. y R. R. García D. 2004. El enfoque de límites difusos (Fuzzy) para la clasificación de tierras en especies sin datos de producción. *Agricultura Técnica en México* 30(1): 5-17.
- Hernández M., E., H. J. Muñoz F., J. Anguiano C., J. T. Sáenz R., F. J. Villaseñor R., A. Rueda S. y J. J. García S. 2007. Áreas potenciales para plantaciones forestales comerciales de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus greggii* Engelm. en Michoacán. In: Memorias del VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. CD de memorias en extenso. Morelia, Mich. México. 9 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. Sistema de Descarga del Continuo de Elevaciones Mexicano. <http://mapserver.inegi.gob.mx>. (julio del 2005).
- Malczewski, J. 1999. GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley and Sons, Co. New York, NY. USA. 392 p.
- Meza S., R. 2003. Identificación de áreas con potencial productivo para damiana en Baja California Sur. INIFAP. Centro de Investigación Regional del Noroeste. Campo Experimental Todos Santos. Folleto Científico No. 2. La Paz, BCS. México. 28 p.
- Olivas G., U. E., J. R. Valdez L., A. Aldrete, M. de J. González G. y G. Vera C. 2007. Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante análisis multicriterio y SIG. *Fitotecnia Mexicana* 39(4):411-419.
- Prado D., J. A. y A. Barros S. 1989. *Eucalyptus*. Principios de silvicultura y manejo. Instituto Forestal División Silvicultura. Santiago, Chile. 199 p.
- Pritchett, W. L. 1990. Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento. LIMUSA. México, D. F. México. 634 p.
- Saaty, T. L. 1980. The analytic hierarchy process. McGraw-Hill Co. New York, NY. USA. 269 p.
- Schönau, A. P. G., R. Themaat and D. I. Von. Verloren 1984. The importance of complete site preparation and fertilizing in the establishment of *Eucalyptus grandis*. *South African Journal of Forestry* 116:1-10.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). 2000. Inventario Nacional Forestal 2000-2001. Cartas inE157f, inE1510f e inE1514f.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana escala 1:250,000. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados. Memoria Nacional. México, D. F. México. 68 p.
- Spurr, S. H. and B. V. Barnes. 1980. Forest ecology. Ronald Press Inc. New York, NY. USA. 571 p.
- The Global Land Cover Facility (GLCF). s/f. Earth Science Data Interface. University of Maryland. College Park, MD. USA. <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml> (junio de 2005).