

Zonificación forestal bajo el concepto de Áreas de Respuesta Homogénea en el centro de México

Forest Zoning Under the Concept of Homogeneous Response Areas in the Center of Mexico

Oscar Reyes Cárdenas,* José Germán Flores Garnica,** Eduardo Javier Treviño Garza,*** Oscar Alberto Aguirre Calderón,**** y Abraham Cárdenas Tristán†

Recibido: 01/06/2018. Aprobado: 05/02/2019. Publicado en línea: 25/03/2019.

Resumen. El aprovechamiento racional de los recursos naturales hace necesario identificar y analizar su condición espaciotemporal; existen diversas técnicas para generar información al respecto basadas en el manejo de información dentro del Sistema de Información Geográfica (SIG). Por ello, el objetivo del presente trabajo fue determinar Áreas de Respuesta Homogénea (ARH) que identifiquen superficies forestales, con condiciones ambientales similares, mediante el empleo de la técnica del álgebra de mapas. Para lograr lo anterior, se utilizó como variable principal el tipo de vegetación (6 clases) y fue complementada con variables físicas del territorio, tales como exposición (5 clases), altitud (7 intervalos) y tipo de suelo (8 clases). Para determinar las ARH se generaron expresiones a partir de la combinación de las clases mencionadas. En total se desarrollaron 2 016 combinaciones. Con el propósito de realizar la validación

de los resultados se utilizaron los datos registrados en los conglomerados del Inventario Nacional Forestal y Suelos 2004-2007.

Como resultado de este estudio se obtuvieron mapas por cada tipo de vegetación, en los cuales se presentan las cinco combinaciones a partir de las que se obtuvieron las mayores superficies. Con la finalidad de determinar la confiabilidad de los resultados se generó una matriz de confusión y se calculó el índice Kappa. A partir de los resultados conseguidos, se considera que, con la combinación de las cuatro variables empleadas en el estudio, es posible determinar superficies forestales, por lo que pueden ser empleadas en la definición de éstas.

Palabras clave: Álgebra de mapas, conglomerados, índice Kappa, matriz de confusión, tipos de vegetación.

* Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. Ingeniería en Geoinformática. Av. Dr. Manuel Nava # 8. Zona Universitaria Poniente. San Luis Potosí, SLP. CP 78290. oscar.reyes@uaslp.mx (<https://orcid.org/0000-0002-5623-9200>)

** Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Experimental Centro Altos de Jalisco. Km. 8, Carretera Libre Tepatitlán-Lagos de Moreno. Tepatitlán de Morelos, Jalisco Apartado Postal Núm. 56 CP. 47600. flores.german@inifap.gob.mx (<https://orcid.org/0000-0002-8295-1744>)

*** Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional #85, Km. 145. Linares, Nuevo León. C.P. 67700. eduardo.trevinogr@uanl.edu.mx (<https://orcid.org/0000-0002-8921-857X>) (Autor de correspondencia)

**** Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional #85, Km. 145. Linares, Nuevo León. C.P. 67700. oscar.aguirrecl@uanl.edu.mx (<https://orcid.org/0000-0001-5668-8869>)

† Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. Ingeniería en Geoinformática. Av. Dr. Manuel Nava # 8. Zona Universitaria Poniente. San Luis Potosí, SLP. CP 78290. abraham.cardenas@uaslp.mx (<https://orcid.org/0000-0003-1807-1715>).

Abstract. The rational use of natural resources makes it necessary to identify and analyze their spatial - temporal condition. There are several techniques to generate information on this subject based on the capabilities of the analysis of a geographic information system (GIS). Considering that the ecosystems and the tree species that compose them are developed in geographic areas with similar environmental requirements, techniques based on the analysis of the information have been developed to look for similar biotic and abiotic conditions. Despite the advantages it represents in saving time and resources the Homogeneous Response Areas (HRA), based on Map algebra has been used in a limited way in Mexico in the evaluation of forest area. The ARH are based on the concept of extrapolation, they allow to use information from easy access areas to areas of difficult access. This can be done in two ways, in both the information of a first ARH is used to estimate a phenomenon or variable in a second ARH. In the first option the results are not validated; in the second a sampling of low intensity is made in the second ARH considering that access to it is difficult. In large areas the mapping of forest areas are required to improve the results of classification using methodologies that consider the information available. The objective of the work was to determine Homogeneous Response Areas (HRA) of natural forest vegetation in the central-northern region of Mexico.

To determine the distribution of six classes (types) of vegetation, the following forests were used as the main variable: oak forest, oak-pine forest, pine forest, pine-oak forest, tropical deciduous forest and tropical semi-evergreen forest, with them two topographical variables –exposition and altitude- were analyzed. In the first variable five classes were considered: Zenit, North, East, South and West, and on the second seven intervals of altitude were considered, in meters above sea level (msnm): 0 - 460, 461 - 921, 922 - 1382, 1383 - 1843, 1844 - 2,304, 2,305 - 2,765 and 2,766 - 3,048). In the same way eight types of soil were

considered: Xerosol, Litosol, Regosol, Rendzina, Vertisol, Feozem, Chernozem, Luvisol. To determine the ARH, expressions were generated from the combination of the aforementioned classes.

In total, 2,016 combinations were developed. Most of the surfaces determined for each type of vegetation were produced as a result of five combinations, in which maps were generated. As a result of the analysis, the pine forest was located mainly in the Feozem soil type and in an altitude range of 2,305 to 2,765 meters above sea level, the pine-oak forest, in S exposure, between 1,383 and 2,304 meters above sea level, the oak forest was located between 922 to 1,843 meters above sea level, the oak-pine forest from 1,383 to 2,304 meters above sea level, tropical deciduous forest in an altitude range of 0 to 921 meters above sea level, with types of lithosol and rendzina soil and tropical semi-evergreen forest was located SE, from 0 to 921 meters above sea level. To validate the results, information was used from 42 sampling clusters of the National Forestry and Soils Inventory 2004 - 2007. A confusion matrix was generated and the Kappa index was calculated, resulting in a Kappa index of 0.886 with respect to the 0.9 presented by the matrix of confusion.

The combination of the four variables used in the present study allows to define forest areas adequately and in a reliable way. An important aspect to consider in the definition of ARH is the selection and number of variables that will be used to make up the zoning. Although it is possible to include variables such as precipitation, temperature or slope to determine if these influence in obtaining better results, the increase in the number of variables implies an increase in the number of possible combinations. For the six types of vegetation, areas of easy and difficult access were located. In the former it is possible to obtain a representative sample and to estimate forest variables in the second type.

Key words: San Luis Potosí, Map algebra, Cluster plot sampling, forest ecosystems, evaluation of forest areas.

INTRODUCCIÓN

Para lograr el aprovechamiento sustentable de los recursos forestales es necesario conocer su cantidad y calidad, así como su variación espacial y temporal (Guevara *et al.*, 2015). En general, esto puede llegar a modelarse espacialmente, teniendo como base los datos obtenidos de forma directa en campo (Danilova *et al.*, 2012). Sin embargo, no siempre es posible llevar a cabo un muestreo representativo del área debido a la dificultad para ingresar a la zona de estudio (por topografía accidentada, por ejemplo) (Almazán-Núñez *et al.*, 2012). Esto impide realizar una evaluación completa de los recursos existentes de interés. Asimismo, cuando se trata de áreas de gran extensión, puede resultar costoso obtener la

información de forma directa, además de que puede consumirse gran cantidad de tiempo (Cruz-Leyva *et al.*, 2010).

Como alternativa a lo anterior, y según la perspectiva de que las especies forestales están directamente relacionadas con las condiciones de su entorno, se espera que se comporten igual (o de forma similar) en las mismas condiciones (altitud, suelo y temperatura, entre otras). Con base en esto es posible caracterizar zonas forestales con el soporte de intensidades de muestreo bajas, lo cual se logra a partir de modelos generados en áreas de condiciones similares y en las cuales ha sido posible realizar un muestreo más intenso. Esta similitud se ha conceptualizado con el término Áreas de Respuesta Homogénea (Velasco *et al.*, 2013),

que se ha usado como apoyo para inventariar y definir la distribución de recursos forestales en áreas de difícil acceso. Estas ARH se definen con las siguientes estrategias: 1. Ubicar, dimensionar y seleccionar las ARH; 2. Obtener la mayor cantidad de información posible de áreas de fácil acceso; 3. Obtener el mínimo de información en áreas de difícil acceso, y 4. Buscar correlaciones espaciales entre factores comunes (reflectancia [sensores remotos], altitud, clima) en las áreas seleccionadas (ARH) y la variable de interés (volumen de madera, densidad, cobertura). De esta forma, se pueden hacer estimaciones de las variables de interés de un área de difícil acceso con base en información de áreas con fácil acceso, donde es importante señalar que el concepto ARH se basa teóricamente en el diseño de muestreo estratificado (Velasco *et al.*, 2013); con ello se pretende disminuir el valor de la varianza en los valores estimados (Roldán-Cortés *et al.*, 2014). También se involucra el análisis multicriterio, dado que intervienen diversas variables (Muñoz *et al.*, 2005) para establecer las citadas áreas. De esta forma, el concepto ARH ha sido empleado en varios estudios, por ejemplo:

1. Definición de zonas con características similares considerando variables topográficas, agrícolas y climáticas (Mena *et al.*, 2007).
2. Delimitación de superficies homogéneas de producción (Merma y Julca, 2012).
3. Regionalización edafoclimática homogénea (Esse *et al.*, 2013).
4. Zonificación agroecológica (González y Hernández, 2016).

De manera teórica, la definición de ARH puede ser sencilla, sin embargo, en la práctica se puede dificultar debido a que, entre las áreas mencionadas, debe considerarse la homologación de escalas, la georreferenciación, las proyecciones y la temporalidad, entre otros aspectos. No obstante, mediante algunas técnicas (por ejemplo, álgebra de mapas), los SIG resultan una estrategia viable (González *et al.*, 2014), ya que permiten integrar y procesar información de factores bióticos y abióticos para determinar el grado de similitud (o diferencia) entre varias áreas (Platts *et al.*, 2011). Por ejemplo,

las ARH se pueden definir con base en similitudes de vegetación, altitud, exposición y tipo de suelo (Encina y Villarreal, 2002).

A pesar de las ventajas que representa el concepto ARH, entre las que se encuentran el ahorro de tiempo y recursos en la evaluación de áreas forestales, su implementación en México ha sido limitada, lo cual se puede explicar por la poca información obtenida y el escaso conocimiento de resultados durante el desarrollo del presente estudio. Las ARH sustentan el concepto de extrapolación, que implica poder usar información de áreas de fácil acceso en áreas de difícil acceso. Desde esta perspectiva existen dos opciones:

1. Usar la información de un ARH1 para hacer estimaciones de algún fenómeno en particular en otra ARH2 de condiciones similares, sin necesidad de hacer evaluaciones del ARH2.
2. Similar a la situación anterior, pero en este caso se toman datos de la ARH2, los cuales, si se considera un difícil acceso, serán de mucho menor intensidad de muestreo en comparación a la toma de datos en el ARH1.

Es claro que la precisión de estas dos perspectivas varía, y es mayor en la segunda estrategia. También es importante considerar que el nivel de incertidumbre en ambos casos es alto, pero siempre será mejor que no contar con información de la ARH2. Por ello, el uso del enfoque de ARH debe ser específico y dirigirlo a situaciones en las que sea difícil acceder o contar con información de un área dada. De esta forma, lo que se busca es hacer estimaciones basadas en áreas con condiciones similares. Por último, debe considerarse que a nivel mundial no existen muchos antecedentes al respecto, por lo que el concepto extrapolación, basado en la definición de ARH, es innovador y contribuye ampliamente a los procesos de muestreo y análisis de datos en inventarios forestales.

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo se describe e implementa una estrategia para la definición y zonificación de ARH en zonas forestales del estado de San Luis Potosí, considerando las siguientes variables: vegetación, suelo, altitud y exposición. Para esto se plantea la hipótesis de que

es posible determinar, ubicar y dimensionar áreas con condiciones similares a través de ARH.

OBJETIVO

El objetivo fue establecer Áreas de Respuesta Homogénea que identifiquen áreas forestales con condiciones ambientales similares, con la finalidad de poder hacer inferencias estadísticas en ARH no muestreadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este trabajo se desarrolló en una zona con vegetación natural forestal que cubrió aproximadamente

500 000 ha y representó 8% del estado de San Luis Potosí, el cual se localiza en la región centro-norte de México, entre las coordenadas 21° 10' y 24° 32' latitud N y 98° 20' y 102° 18' longitud O.

En la serie V de la carta de uso de suelo y vegetación elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en 2014, se establece que en la zona de estudio se encuentran los siguientes tipos de vegetación: bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de pino, bosque de pino-encino, selva baja caducifolia y selva mediana subperennifolia (Figura 1).

Las variaciones altitudinales en el área de estudio van de los 0 hasta los 3 048 msnm (Figura 2). Los climas que se presentan son seco, templado y cálido con temperatura media anual que varía de 10 °C a 26 °C, mientras que el intervalo de precipitación anual oscila entre 200 mm a 3 500 mm.

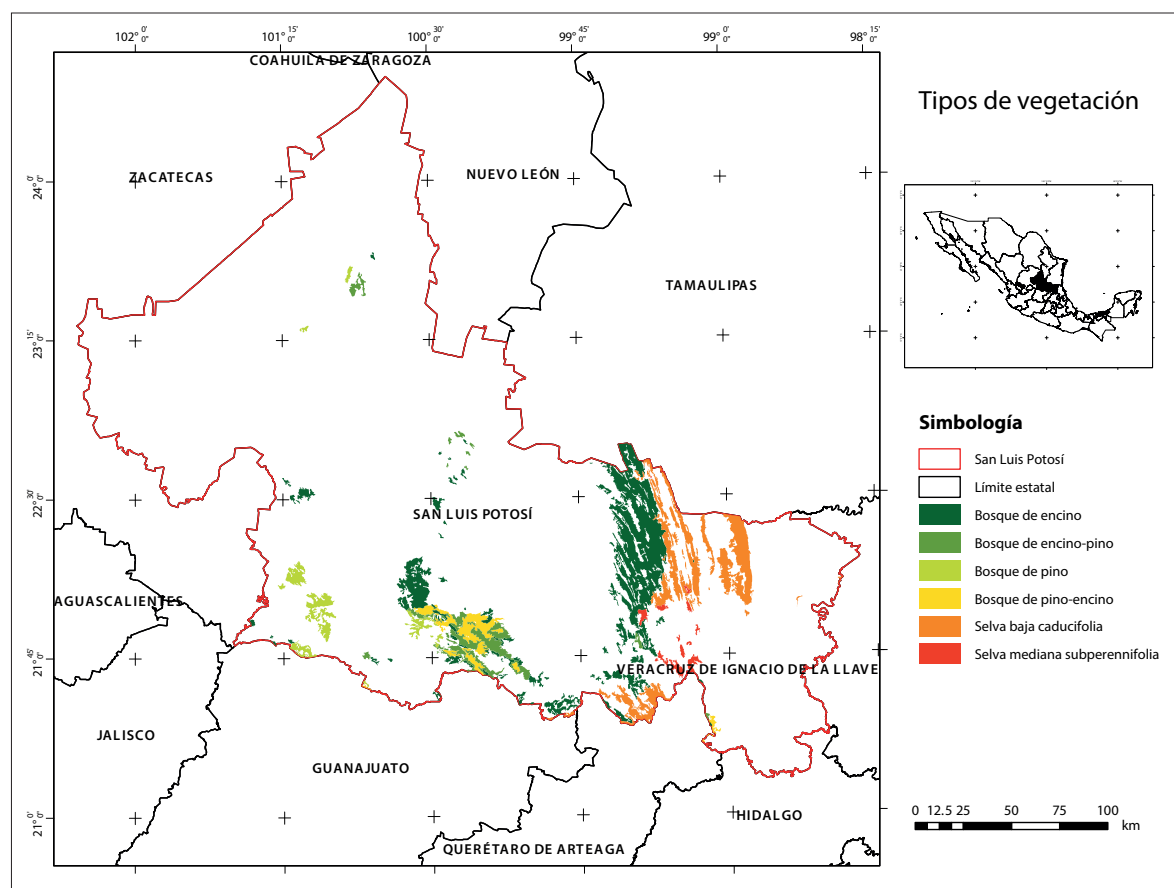


Figura 1. Principales tipos de vegetación forestal en el estado de San Luis Potosí, México. Fuente: elaboración propia.

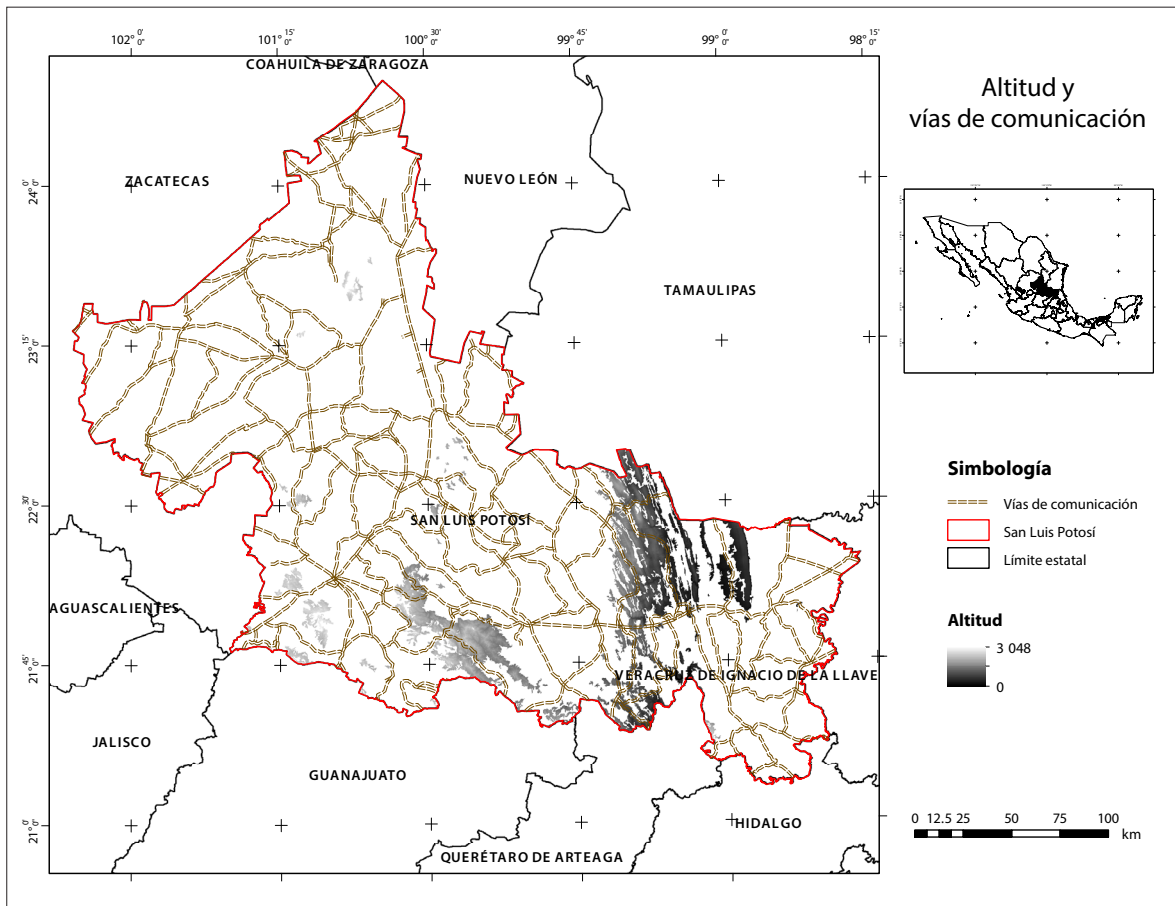


Figura 2. Variación altitudinal y vías de comunicación en la zona de la región forestal del estado de San Luis Potosí. Fuente: elaboración propia.

Con respecto a la exposición del terreno, 2.97% corresponde al zenit; 22.17%, al norte; 29.24%, al este; 20.63%, al sur, y 24.99%, al oeste.

Para analizar la distribución de la altitud en la zona de estudio, se utilizó el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 elaborado por el Inegi en 2012, el cual representa las elevaciones del territorio continental de México y tiene una resolución de píxel de 15 m. A partir de este modelo de elevación digital (Figura 2), se generaron las variables empleadas en la modelación de las ARH altitud y exposición. Con referencia a la primera, se establecieron 7 intervalos con una temperatura aproximada de 3 °C entre cada uno, ya que, de acuerdo con García (2004), en México se presenta, en promedio, un incremento de 0.65 °C por cada 100 m de altura.

Además, se muestran las vías de comunicación en el estado de San Luis Potosí.

De acuerdo con la carta edafológica generada por el Inegi en 2004, en la zona de estudio se localizan los siguientes tipos de suelo: xerosol localizado al NE, O y SO; litosol, al E, NE, SE, O, NO y SO; regosol, al E, NE, SE, O, NO y SO; rendzina, al NE, E, SE y S; vertisol, al NE, E, SE, S y NO; feozem, al S, SE, O y SO; chernozem, al SE, y luvisol, al S, SE y SO. En la Figura 3 se muestra su ubicación espacial.

Generación de mapas de ARH

Para la obtención de los mapas de las Áreas de Respuesta Homogénea se empleó la técnica de álgebra de mapas, la cual comprende una serie

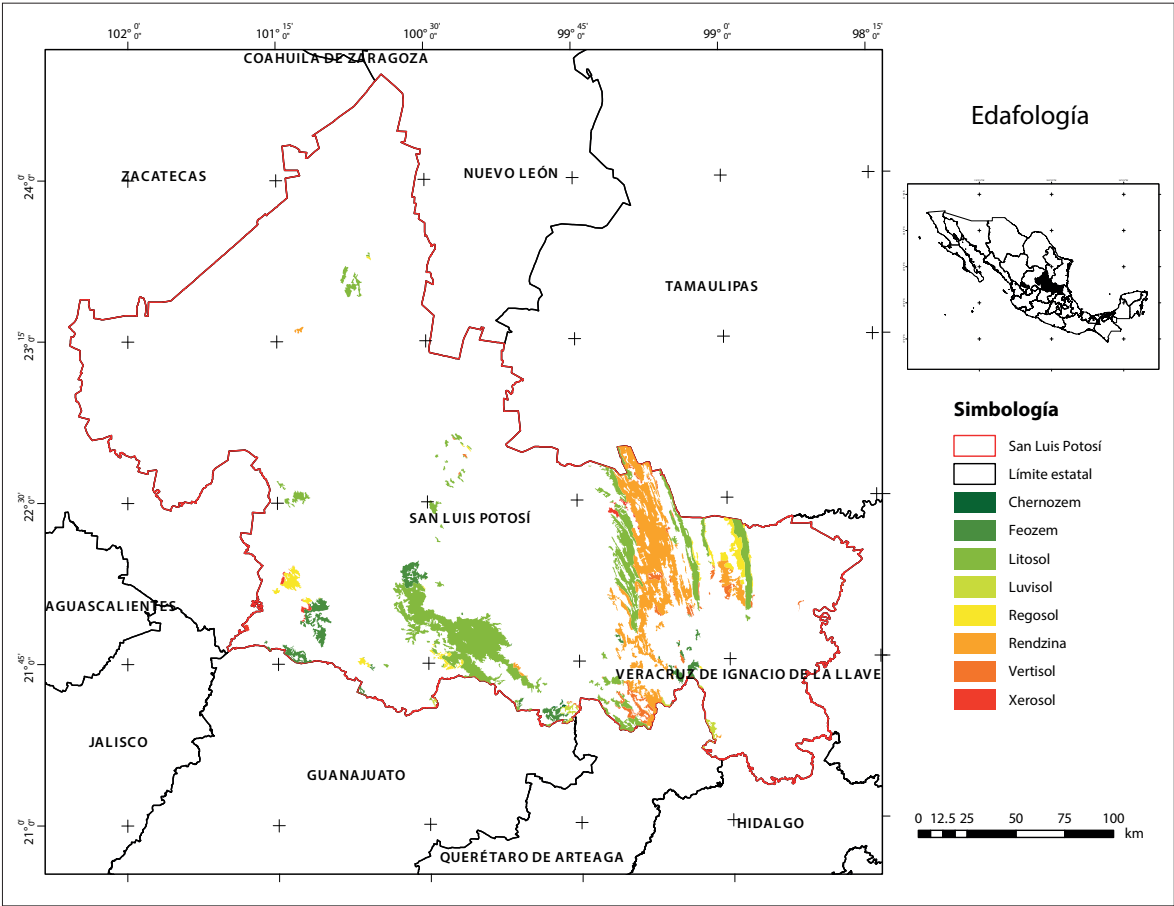


Figura 3. Tipos de suelo en el área de la región forestal del estado de San Luis Potosí. Fuente: elaboración propia.

de herramientas y métodos para extraer nueva información a partir de capas raster (Velasco *et al.*, 2013). Las variables que se usaron para la deter-

minación de las ARH fueron: vegetación (6 tipos), exposición (5 direcciones), altitud (7 intervalos) y tipo de suelo (8 clases) (Tabla 1).

Tabla 1. Variables utilizadas en la determinación de las Áreas de Respuesta Homogénea para la vegetación forestal del estado de San Luis Potosí.

Variable	Categorías
1. Vegetación	1.1. Bosque de pino; 1.2 Bosque de pino-encino; 1.3 Bosque de encino; 1.4 Bosque de encino-pino; 1.5 Selva baja caducifolia; 1.6 Selva mediana subperennifolia
2. Exposición	2.1. Zenit; 2.2. Norte; 2.3. Este; 2.4. Sur; 2.5. Oeste
3. Altitud (m)	3.1. (0 – 460); 3.2. (461 – 921); 3.3. (922 – 1 382); 3.4. (1 383 – 1 843); 3.5. (1 844 – 2 304); 3.6. (2 305 – 2 765); 3.7. (2 766 – 3 048)
4. Suelo	4.1. Xerosol; 4.2. Litosol; 4.3. Regosol; 4.4. Rendzina; 4.5. Vertisol; 4.6. Feozem; 4.7. Chernozem; 4.8. Luvisol

Fuente: elaboración propia.

Con base en las categorías señaladas en la Tabla 1, las ARH se definen de acuerdo con el cumplimiento de las expresiones establecidas en la técnica del álgebra de mapas. En dichas expresiones se combinan las diferentes variables involucradas en el análisis, lo cual puede expresarse, de forma general, como se muestra en la ecuación 1:

$$\text{ARH} = (\text{vegetación [1-6]}) \ \& \ (\text{exposición [1-5]}) \\ \& \ (\text{altitud [1-7]}) \ \& \ (\text{edafología [1-8]}) \quad (1)$$

De acuerdo con la técnica del álgebra de mapas, se definen expresiones mediante la combinación de operadores matemáticos y condicionantes (Alcalá y López, 2017). De esta forma, cuando se presenta la condición se obtiene un raster con los píxeles que cumplen con dicha expresión; en caso contrario, no se obtiene resultado alguno. De esta manera, se tiene que, por ejemplo, la primera de las combinaciones fue la siguiente:

$$(\text{"vegetación"} = 1) \ \& \ (\text{"exposición"} = 1) \\ \& \ (\text{"altitud"} = 1) \ \& \ (\text{"edafología"} = 1)$$

Mediante la combinación anterior se emplearon las siguientes condicionantes y operador: tipo de vegetación bosque de encino-pino ("vegetación" = 1), exposición del terreno al zenit ("exposición" = 1), intervalo de altitud de 8 – 460 msnm ("altitud" = 1) y tipo de suelo xerosol ("edafología" = 1) y el operador &, con el cual se deberían cumplir todas las condicionantes para obtener un resultado positivo, de tal manera que cada uno de los parámetros se fueron modificando hasta que se

cubrieran todas las clases de las cuatro variables empleadas.

En la Figura 4 se muestra el esquema de combinaciones realizadas en este análisis. Éstas se realizaron para cada tipo de vegetación, exposición, intervalo de altitud y tipo de suelo.

Validación

Con base en la identificación de las especies registradas en los conglomerados del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) desarrollado por la Comisión Nacional Forestal, se determinaron los tipos de vegetación a los que corresponde cada una de las ARH que se obtuvieron en el estudio. La información de estos conglomerados, cuya separación mínima es de 5 km, se recopiló entre 2005 y 2007 (Pérez-Vega *et al.*, 2016). A partir de los resultados obtenidos en el análisis (ARH) y la clasificación de los datos del INFyS, se desarrolló una matriz de confusión para estimar la precisión (Buendía-Rodríguez *et al.*, 2002).

De la matriz de confusión se obtuvieron los errores de omisión y de comisión. Los primeros se refieren a los valores que pertenecen a una categoría, pero no se incluyeron en ésta, mientras que los segundos se presentan cuando los valores se incluyen en una categoría a la que no pertenecen. Para obtener estos errores se emplearon las ecuaciones 2 y 3 (Buendía-Rodríguez *et al.*, 2002):

$$E_{oi} = \frac{(X_{i+}) - (X_{ii})}{(X_{i+})} \quad (2)$$

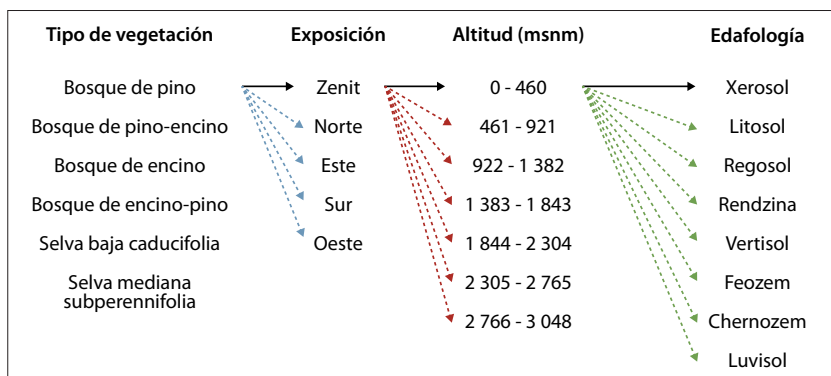


Figura 4. Ejemplo de las posibles combinaciones empleadas para definir las Áreas de Respuesta Homogénea. Fuente: elaboración propia.

donde: E_{oi} : error de omisión, X_{i+} : marginal de la fila i y X_{ii} : valor en la diagonal de dicha línea

$$E_{ci} = \frac{(X_{+i}) - (X_{ii})}{(X_{+i})} \quad (3)$$

donde: E_{ci} : error de comisión, X_{+i} : marginal de la columna i y X_{ii} : valor en la diagonal de dicha columna.

La precisión total de la matriz de confusión se determina a partir de la información situada en la diagonal principal, por lo que no considera los valores de los errores de omisión y comisión, es decir, los valores que se clasificaron correctamente.

Finalmente, se calculó el índice Kappa para determinar la exactitud de las estimaciones. Para obtener este índice se utilizó la ecuación 4:

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^n (x_{ii}) - \sum_{i=1}^n (x_{i+} x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^n (x_{i+} x_{+i})} \quad (4)$$

donde: κ : índice Kappa, x_{ij} : acuerdo observado, $x_{i+} x_{+i}$: producto de los marginales indican el acuerdo esperado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Áreas de respuesta homogénea

En total se desarrollaron 2 016 combinaciones. En la Tabla 2 se muestran los valores de las cinco combinaciones que arrojaron las mayores superficies para cada tipo de vegetación.

Los valores en que se obtuvieron más resultados para las diferentes variables fueron los intervalos de altura de 0 m a 461 m y de 1 383 m a 1 843 m y en los suelos feozem y litosol, mientras que la exposición al E se presentó en la mayoría de las ocasiones.

En las figuras 5 a 10 se muestran las cinco combinaciones a partir de las cuales se obtuvieron las mayores superficies para cada tipo de vegetación. A y B corresponden a diferentes ubicaciones de las ARH.

Las mayores ARH para bosque de pino se ubicaron al SO de la zona de estudio. Este tipo de vegetación se localizó principalmente en el tipo de suelo feozem y en un intervalo de altitud de 2 305 msnm a 2 765 msnm, condiciones similares a las reportadas por Muñoz *et al.* (2015) en la Sierra Purépecha, en Michoacán (Figura 5).

Tabla 2. Superficie que corresponde a las diferentes unidades que componen un conjunto de ARH.

Vegetación	Altitud (msnm)	Suelo	Área 1 (ha)	Área 2 (ha)	Área 3 (ha)	Área 4 (ha)	Área 5 (ha)
Bosque de pino	2 305 – 2 765	Feozem	3.550 (N)	3.477 (E)	3.446 (O)	3.166 (S)	2.220 (N)
Bosque de pino-encino	1 383 – 1 843	Litosol					2.937 (N)
	1 844 – 2 304	Litosol	7.310 (N)	6.383 (E)	5.150 (O)	4.160 (S)	
Bosque de encino	922 – 1 382	Rendzina	21.379 (E)	15.192 (O)			11.946 (S)
	1 383 – 1 843	Litosol			14.137 (E)	13.038 (N)	
Bosque de encino-pino	1 383 – 1 843	Litosol	5.756 (E)		5.457 (N)		
	1 844 – 2 304	Litosol		5.627 (E)		4.576 (S)	4.407 (N)
Selva baja caducifolia	0 – 460	Rendzina			7.900 (E)	7.425 (O)	
	461 - 921	Litosol	9.896 (O)				6.901 (E)
	461 – 921	Rendzina		9.198 (E)			
Selva mediana subperennifolia	0 - 460	Feozem	1.406 (E)		993 (O)		
	461 -921	Feozem				985 (E)	
	461 - 921	Rendzina		1.081 (E)			850 (S)

Fuente: Elaboración propia.

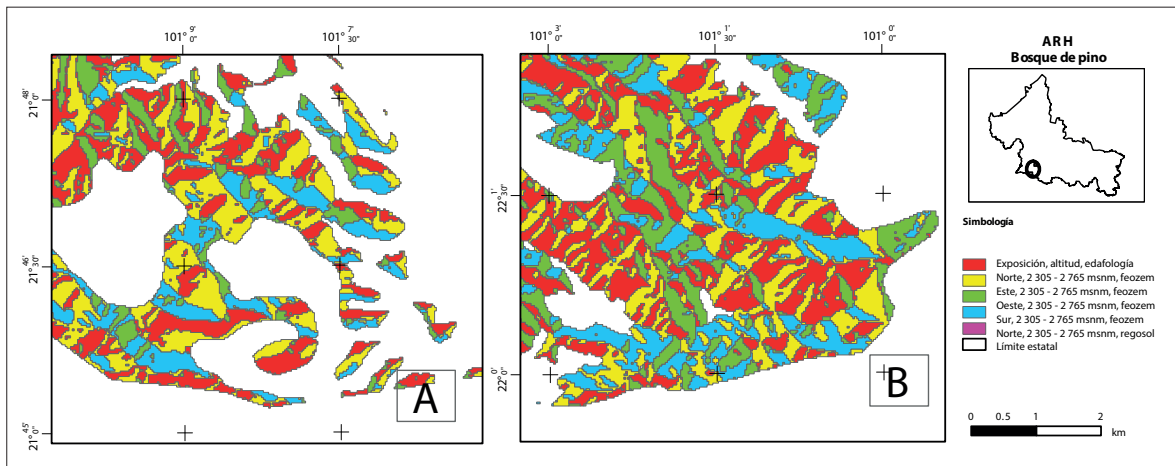


Figura 5. Áreas de respuesta homogénea que corresponden al bosque de pino. Fuente: elaboración propia.

Por lo que respecta al bosque de pino-encino, las áreas más grandes se ubicaron al S, en un gradiente altitudinal de 1 383 msnm a 2 304 msnm, lo cual coincide con lo reportado por Santiago *et al.* (2012), quienes ubicaron este tipo de vegetación en un intervalo de 2 000 a 2 100 msnm en la Sierra de Quila, en el estado de Jalisco (Figura 6).

El bosque de encino se localizó mayormente en el centro y al N de la zona, en un intervalo de altitud entre 922 msnm a 1 843 msnm, lo cual corresponde con lo obtenido por Encina y Villarreal (2002), quienes reportan un rango de altitud de 1 500 msnm a 2 700 msnm en Coahuila (Figura 7).

Por lo que se refiere al bosque de encino-pino, las mayores ARH se localizaron en el S de la zona de análisis, desde los 1 383 msnm hasta los 2 304 msnm, en tipo de suelo litosol y, en ocasiones, con exposición al N, lo cual es similar a lo presentado por González-Elizondo *et al.* (1993) en la biosfera La Michilia, en Durango (Figura 8).

En cuanto a la selva baja caducifolia, se ubicó espacialmente al N y SE, en un intervalo de altura de 0 msnm a 921 msnm, con tipos de suelo litosol y rendzina, valores semejantes a los presentados por Martínez y Galindo-Leal (2002), en Calakmul, Campeche (Figura 9).

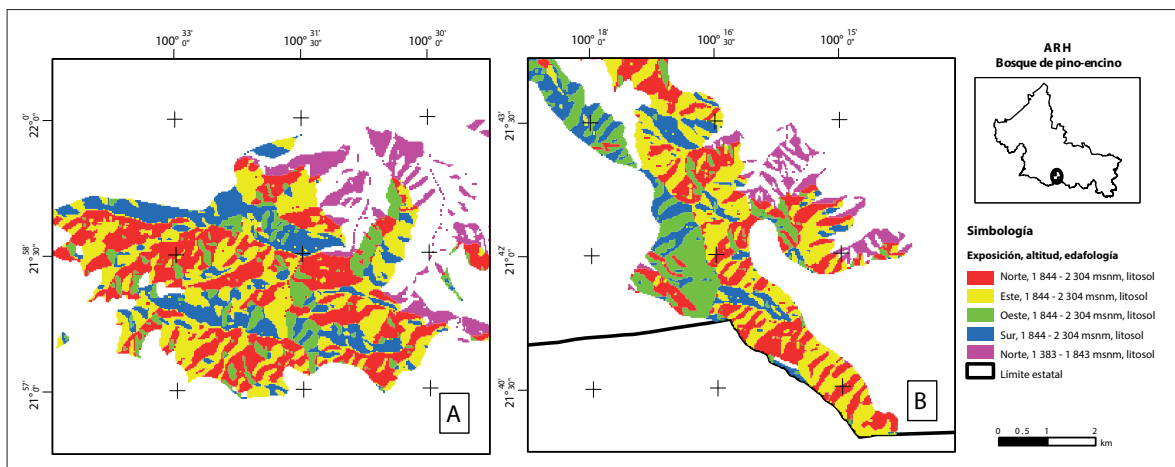


Figura 6. Áreas de respuesta homogénea que corresponden al bosque de pino-encino. Fuente: elaboración propia.

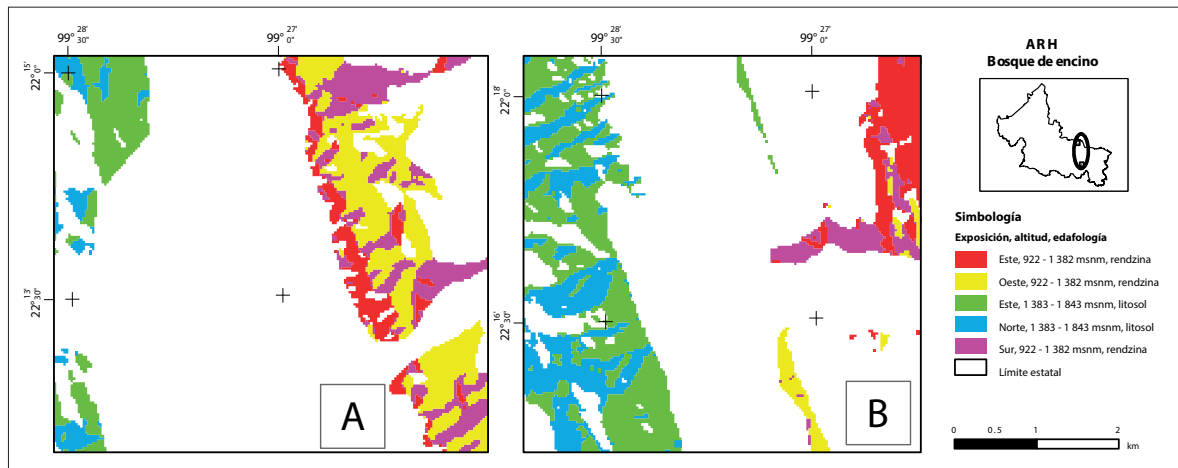


Figura 7. Áreas de respuesta homogénea que corresponden al bosque de encino. Fuente: elaboración propia.

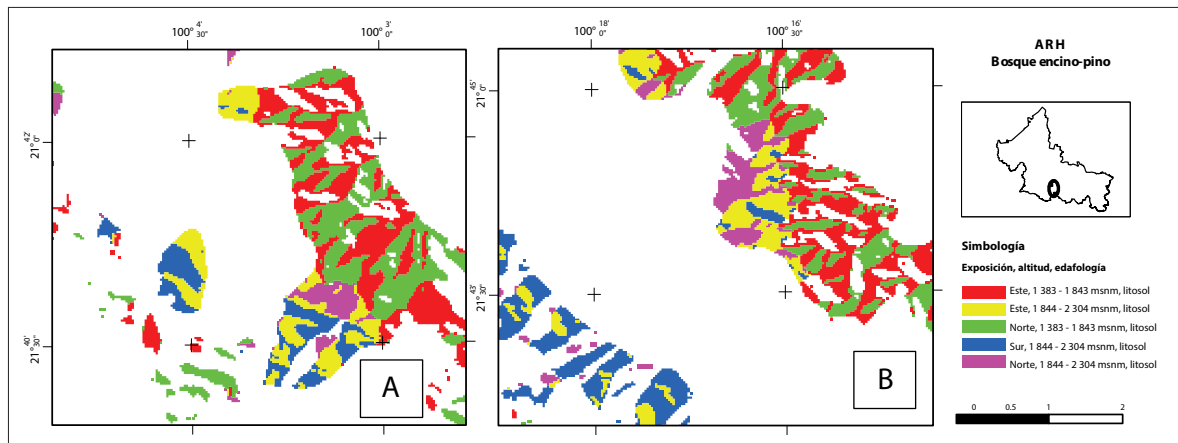


Figura 8. Áreas de respuesta homogénea que corresponden al bosque de encino-pino. Fuente: elaboración propia.

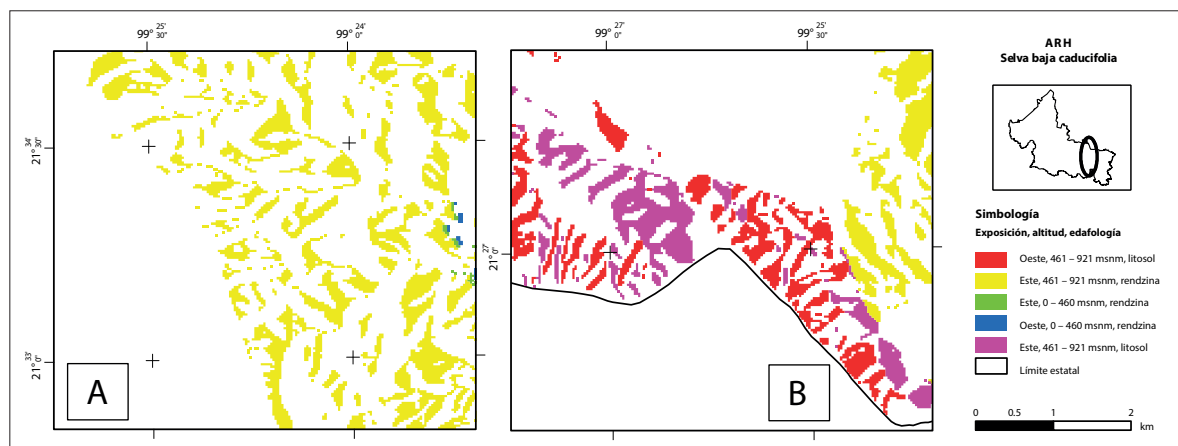


Figura 9. Áreas de respuesta homogénea que corresponden a la selva baja caducifolia. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la selva mediana subperennifolia se localizó al SE, desde 0 msnm a los 921 msnm, altitud similar a la reportada por Basáñez *et al.* (2008) en un estudio realizado en el estado de Veracruz (Figura 10).

Validación

En la Figura 11 se muestra la ubicación espacial de los conglomerados empleados para la validación de los resultados. En el estado de San Luis Potosí se establecieron 419 conglomerados del INFyS, de los cuales 42 se ubicaron dentro del área de estudio.

Una vez que se realizó el análisis cualitativo de los resultados, se determinó la confiabilidad de los resultados a través de una matriz de confusión, donde se compararon las estimaciones del tipo de vegetación de las ARH con los tipos de vegetación correctos, los que se definieron con base en la información del INFyS. En dicha matriz los valores que se encuentran en la diagonal principal representan los datos que han sido estimados correctamente, mientras que los que se encuentran fuera representan aquellos que no han sido clasificados de forma correcta (Camacho-Sanabria *et al.*, 2015).

Como se observa en la Tabla 3, cuatro categorías presentaron un alto nivel de correspondencia en el establecimiento de las ARH respecto a los valores registrados en el INFyS, las cuales son bosque de pino, bosque de encino, bosque de encino-pino y selva mediana subperennifolia, mientras que en las categorías bosque de pino-encino y selva baja ca-

Tabla 3. Comparación de los tipos de vegetación definidos por las ARH y el INFyS a través de una matriz de confusión.

		Áreas de Respuesta Homogénea					
		BP*	BQ**	BQP***	SBC****	SMQ*****	Total
INFyS	BP	5	0	0	0	0	5
	BPQ	0	0	0	2	0	2
	BQ	0	0	18	0	0	18
	BQP	0	0	1	13	0	14
	SBC	0	0	0	0	0	0
	SMQ	0	0	1	0	0	2
	Total	5	0	20	15	0	42

* BP: Bosque de pino, ** BPQ: Bosque de pino-encino, *** BQ: Bosque de encino, **** BQP: Bosque de encino-pino, ***** SBC: Selva baja caducifolia y ***** SMQ: Selva mediana subperennifolia.

Fuente: elaboración propia.

ducifolia no se ubicaron conglomerados del INFyS en las ARH establecidas en el estudio.

En la Tabla 4 se muestran los cálculos de los errores de omisión y comisión; se observa que los

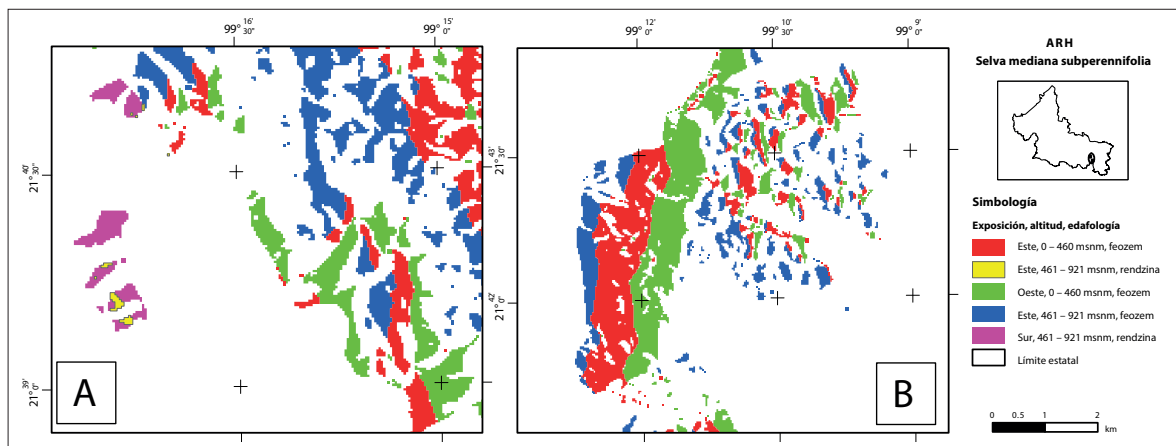


Figura 10. Áreas de respuesta homogénea que corresponden a selva mediana subperennifolia. Fuente: elaboración propia.

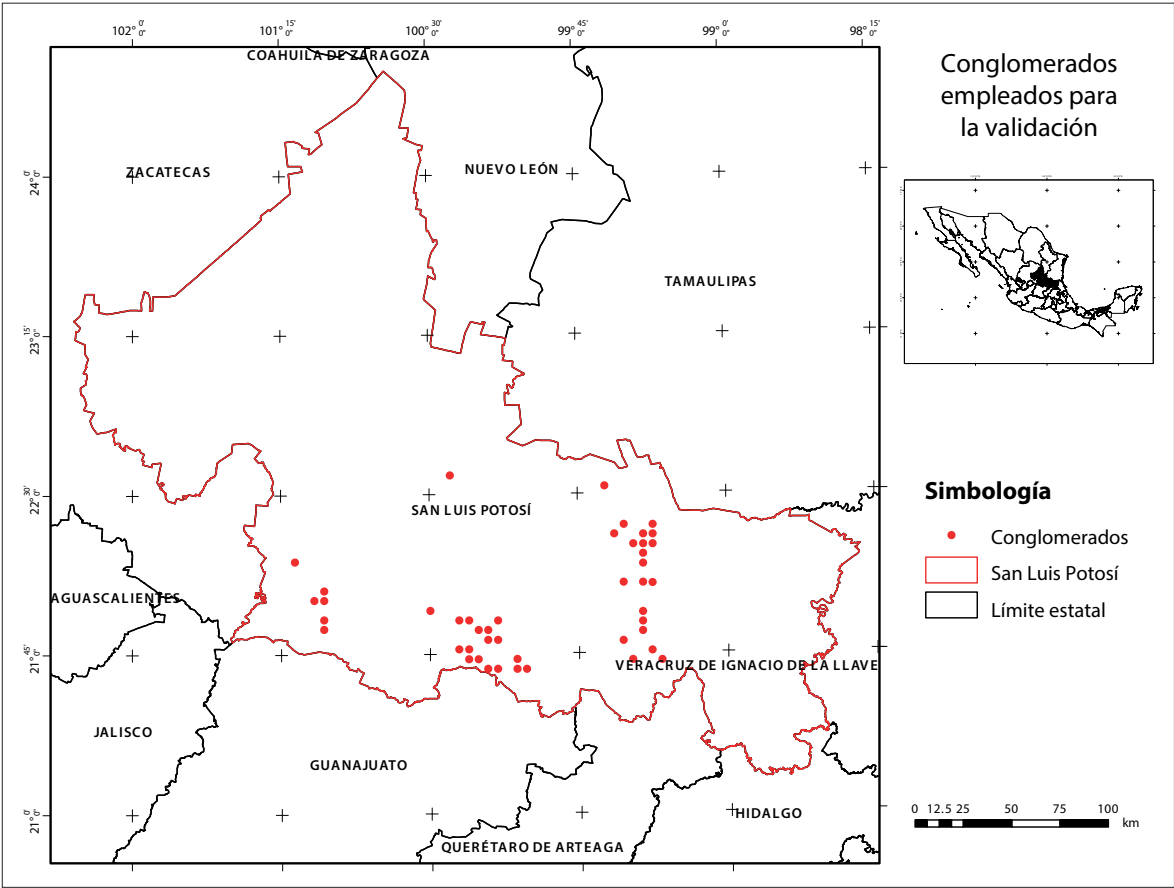


Figura 11. Localización espacial de los conglomerados utilizados para validación de las ARH en el estado de San Luis Potosí. Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Errores de omisión y comisión resultantes de la comparación de las similitudes entre los tipos de vegetación definidos por las ARH y los registrados en el INFyS.

	Cálculo	Error de omisión	Cálculo	Error de comisión
BP*	5/5 = 1	0%	5/5 = 1	0%
BPQ**	0/0	-	0/2 = 0	100%
BQ***	18/20 = 0,9	10%	18/18 = 1	0%
BQP****	13/15 = 0,87	13%	13/14 = 0,93	7%
SBC*****	0/0	-	0/0	-
SMQ*****	2/2 = 1	0%	2/3 = 0,67	33%
Total	38/42 = 0.90 Precisión = 90% Error = 10%			

* BP: Bosque de pino, ** BPQ: Bosque de pino-encino, *** BQ: Bosque de encino, **** BQP: Bosque de encino-pino, ***** SBC: Selva baja caducifolia y ***** SMQ: Selva mediana subperennifolia.

Fuente: elaboración propia.

mejores resultados fueron para bosque de encino y bosque de encino-pino (0.9 y 0.87 respectivamente), mientras que los mayores errores de comisión fueron para el bosque de pino-encino y la selva mediana subperennifolia (100% y 33%, respectivamente).

Se calculó el índice Kappa para determinar si los resultados de la clasificación fueron en realidad obtenidos o no respecto a los producidos simplemente al azar. Se obtuvo la correspondencia entre ambos conjuntos de datos (Tabla 5), y resultó 0.856 de índice Kappa respecto a 0.9 que presentó la matriz de confusión, a partir de lo cual se puede deducir que aproximadamente 5% de la clasificación es debida al factor del azar.

CONCLUSIONES

Como resultado del análisis de la precisión y los errores de omisión y comisión, se acepta la hipótesis de que es posible determinar, ubicar y dimensionar áreas con condiciones similares mediante la técnica del álgebra de mapas, ya que se obtuvo una precisión de 90% (matriz de confusión) y 85,6% (índice Kappa). Asimismo, el valor de este índice indica que los resultados obtenidos no reflejan el producto de una selección al azar, ya que alrededor de 5% se consideraría de esa manera.

Se estima que, con la combinación de las cuatro variables empleadas en el estudio (tipo de vegetación, exposición, altitud y edafología), es posible determinar adecuadamente superficies forestales, por lo que pueden ser empleadas en la definición de éstas.

Un aspecto importante en la definición de ARH es la selección y el número de variables que

se emplearán para realizar la zonificación, ya que se debe considerar que el aumento en el número de variables implica un incremento en el número de combinaciones posibles.

Para los seis tipos de vegetación se ubicaron zonas de fácil acceso y otras a las que es difícil arribar, por lo que en las primeras se podría obtener un muestreo representativo y, con base en ello, estimar variables forestales en las segundas. Se recomienda que en otros estudios se incluyan variables como la precipitación, la temperatura o la pendiente para determinar si influyen en la obtención de mejores resultados.

REFERENCIAS

- Alcalá, E. B. y López, L. A. (2017). Zonas con potencial agroturístico en la región citrícola de Nuevo León, México: un análisis a partir del álgebra de mapas. *Cuadernos de Turismo*, 39, 17-40.
- Almazán-Núñez, R. C., Arizmendi, M. C., Eguiarte, L. E. y Corcuera, P. (2012). Changes in Composition, Diversity and Structure of Woody Plants in Successional Stages of Tropical Dry Forest in Southwest Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83, 1096-1109. DOI: 10.7550/rmb.30403
- Basáñez, A. J., Alanís, J. L. y Badillo, E. (2008). Composición florística y estructura arbórea de la selva mediana subperennifolia del ejido "El Remolino", Papantla, Veracruz. *Avances en investigación agropecuaria*, 12(2), 3-21.
- Buendía-Rodríguez, E., Islas-Gutiérrez, F. y Guerra-De la Cruz, V. (2008). Identificación de áreas erosionadas por medio de imágenes Landsat ETM+ en Tlaxco y Terrenate, Tlaxcala, México. *Terra latinoamericana*, 26(1), 1-9.
- Buendía-Rodríguez, E., Vargas-Pérez, E., Leyva-Ovalle, A. y Terrazas-Domínguez, S. (2002). Aplicación de redes neuronales artificiales y técnicas SIG para la

Tabla 5. Cálculo del índice Kappa.

	Cálculo	Resultado
Acuerdo observado	$5 + 18 + 13 + 2$	38
Acuerdo esperado	$(5*5) + (0*2) + (20*18) + (15*14) + (2*3)$	601
Población total	42	42
Índice Kappa	$((42*38) - 601) / (42^2 - 601)$	0.856

Fuente: elaboración propia.

- predicción de coberturas forestales. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 8(1), 31-37.
- Camacho-Sanabria, J. M., Juan, J. I., Pineda, N. B., Cadena, E. G., Bravo, L. C. y Sánchez, M. (2015). Cambios de cobertura/uso de suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*, 21(1), 93-112.
- Cruz-Leyva, I. A., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., Santos-Posadas, H. M. de los (2010). Modelación espacial de área basal y volumen de madera de bosques manejados de *Pinus patula* y *P. teocote* en el ejido Atopixco, Hidalgo. *Madera y Bosques*, 16(3), 75-97.
- Danilova, I., Ryzhkova, V. y Korets, M. (2012). Recognizing Vegetation Chronosequence in Landsat Imagery. *Bosque*, 33(3), 359-362. DOI: 10.4067/S0717-92002012000300022
- Encina, J. A. y Villarreal, J. A. (2002). Distribución y aspectos ecológicos del género *Quercus* (Fagaceae), en el estado de Coahuila, México. *Polibotánica*, 13, 1-23.
- Esse, C., Donoso, P. J., Gerding, V. y Encina-Montoya, F. (2013). Determination of Homogeneous Edaphoclimatic Zones for the Secondary Forests of *Nothofagus dombeyi* in Central-Southern Chile. *Ciencia e investigación agraria*, 40(2), 351-360.
- García, E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. México: Instituto de Geografía-UNAM.
- González, H. A. y Hernández, J. R. (2016). Zonificación agroecológica del *Coffea arabica* en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, 90, 105-118. DOI: 10.14350/rig.49329
- González, R., Juárez J. F., Aceves, L. A., Rivera, B. y Guerrero, A. (2014). Zonificación edafoclimática para el cultivo de *Jatropha curcas* L., en Tabasco, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, 86, 25-37. DOI: 10.14350/rig.39936
- González-Elizondo, S., González-Elizondo, M. y Cortés-Ortiz, A. (1993). Vegetación de la reserva de la biosfera La Michilia, Durango, México. *Acta botánica mexicana*, 22, 1-104.
- Guevara, M. L., Rosa, M. B. y Flores, M. L. (2015). Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales desde la visión de las comunidades indígenas: Sierra Norte del estado de Puebla. *Nova Scientia*, 7(14), 511-537.
- Martínez, E. y Galindo-Leal, C. (2002). La vegetación de Calakmul, Campeche, México: clasificación, descripción y distribución. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 71, 7-32. DOI: 10.17129/botsoci.1660
- Mena, C., Ormazábal, Y., Llanos, J. L. y Díaz, J. (2007). Desarrollo de un sistema de información geográfica para mejorar la gestión del agua de riego del embalse Convento Viejo, Chile. *Agricultura técnica*, 67(1), 49-59.
- Merma, I., y Julca, A. (2012). Descripción del medio y bases de zonificación del Alto Urubamba, Cusco, Perú. *Ecología Aplicada*, 11(1), 13-21.
- Muñoz, C. A., Treviño, E. J., Verástegui, J., Jiménez, J. y Aguirre, O. A. (2005). Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación de peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México. *Investigaciones geográficas*, 56, 101-117.
- Muñoz, H. J., Sáenz, J. T., García, J., Coria, V. M. y Muñoz, Y. (2015). Áreas potenciales para establecer plantaciones comerciales de pino en la Sierra Purhépecha, Michoacán. *Foresta Veracruzana*, 17(2), 35-42.
- Pérez-Vega, A., Rocha, F. y Regil, H. H. (2016). Distribución espacial del uso/cubierta de suelo y degradación forestal en la reserva biosfera Sierra Gorda de Guanajuato. *Acta universitaria*, 2, 33-44. DOI: 10.15174/au.2016.1500
- Platts, P. J., Burgess, N. D., Gereau, R. E., Lovett, J. C., Marshall, A. R., McClean, C. J., Pellikka, P., Swetnam, R. D. y Marchant, R. (2011). Delimiting Tropical Mountain Ecoregions for Conservation. *Environmental Conservation*, 38(3), 312-324. DOI: 10.1017/S0376892911000191
- Roldán-Cortés, M. A., Santos-Posadas, H. M. de los, Ramírez-Maldonado, H., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G. y Velázquez-Martínez, A. (2014). Estimadores de muestreo para inventario de plantaciones forestales comerciales de eucalipto en el sureste mexicano. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(26), 38-57.
- Santiago, A. L., Villavicencio, R., Godínez, J. J., Chávez, J. M. y Toledo, S. L. (2012). Tamaño de fragmentos forestales en el bosque de pino-encino, Sierra de Quila, Jalisco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 3(14), 23-38.
- Velasco, J. A., Flores, J. G., Márquez, B. y López, S. (2013). Áreas de Respuesta Homogénea para el muestreo de combustibles forestales. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(15), 41-52.