



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
POSGRADO DE GEOGRAFÍA

**LA CONTRIBUCIÓN DE LOS ATRIBUTOS DEL RELIEVE
PARA EXPLICAR LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA
VEGETACIÓN: ESTUDIO DE CASO EN UNA ZONA DE
MONTAÑA DE ALTA DIVERSIDAD**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A

AZUCENA PÉREZ VEGA

Director de Tesis

Dr. Alejandro Velázquez Montes

Revisores

Dr. Felipe García Oliva

Dr. J. Manuel Maass Moreno

Dr. Mario Arturo Ortiz Pérez

Dr. Lorenzo Vázquez Selem

Esta Investigación fue realizada gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la DGAPA de la UNAM

Mayo del 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



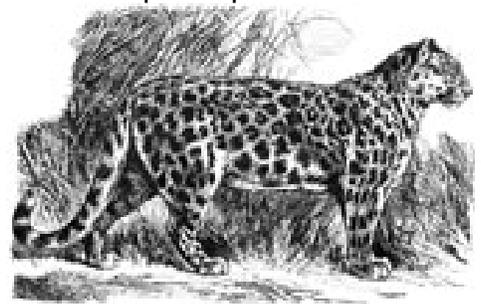
UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A la belleza del jaguar habitante de su bosque tropical.



Dedico este trabajo a mi familia pequeña: primero a mis chiquitos Juliette y Marcos porque son mi impulso para seguir en la vida y por aguantar a una mamá con tan poco tiempo disponible para ellos. Y por supuesto a François por su paciencia y amor que me ha brindado a lo largo de nuestro camino.

A mi familia grande: en especial a mi madre por todo lo bueno que me ha dado y por todo lo que ha sacrificado. A ti padre donde quiera que estés, sé que siempre estarás cuidándome y a todos mis hermanos por lo que nos ha tocado vivir a través del tiempo, para bien o para mal, pero siempre sin dejar de amarnos y creciendo para ser mejores personas.

Y por último a toda la bola de sobrinos que son un restoran, saben que los quiero.

RECONOCIMIENTOS DE APOYO

Agradezco la beca que recibí a lo largo de cuatro años, a través de CONACYT, con registro 175354, financiamiento fundamental para el desarrollo y culminación del trabajo de tesis.

Gracias, al posgrado de Geografía de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM, por brindarme la oportunidad de realizar los estudios de doctorado.

Mi reconocimiento al apoyo financiero obtenido por los fondos del PAPIIT, con IN112803, el cual fue esencial para llevar a cabo las diversas salidas de campo.

Mi reconocimiento a la Universidad P. Sabatier (Francia) por poner a nuestra disposición la imagen SPOT a través del programa ISIS (Incitation à l'Utilisation Scientifique des Images SPOT) en el ámbito de colaboración con la dicha universidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser un recinto, al cual todavía podemos tener cabida un importante número de estudiantes de familias de clase media baja, lo cual no sería posible sin las luchas estudiantiles que han defendido su gratuidad, pluralidad y autonomía a lo largo de la historia de UNAM.

En segunda instancia, quiero agradecer al grupo de sínodos, por sus comentarios certeros y atinados, los cuales mejoraron la calidad del manuscrito final.

Al Dr. Alejandro Velázquez, asesor de la presente tesis, quien siempre estuvo disponible y con buen ánimo de aclarar mis dudas y enseñarme nuevos enfoques del conocimiento científico. Gracias, Ale.

Al Dr. Lorenzo Vázquez por sus valiosos comentarios para las publicaciones resultado de presente trabajo y por la madurez y ética profesional que lo caracteriza. Mi más sincero agradecimiento al Dr. Mario Arturo por su disposición a la revisión del manuscrito.

Al Dr. José Manuel Maass, por las sugerencias y corrección de estilo, los cuales resultaron fundamentales para un mayor entendimiento del trabajo.

De forma muy especial al Dr. Felipe García-Oliva por sus recomendaciones precisas y por el cuidadoso empeño que realizó en la revisión del presente trabajo.

Y al Dr. Jean François Mas, que sin conformar parte del sínodo, su contribución y aporte académico en la presente tesis fue esencial en cada etapa de la misma.

Al Dr Gerardo Bocco, agradezco el espacio de trabajo dentro del Centro de Investigaciones de Geografía Ambiental

Mi más profundo agradecimiento al Sr. Pablito Valladares quien fue mi guía en campo, gracias por compartir su conocimiento y por esa alegría que hacía que el duro trabajo fuera placentero. Al Jefe de Tenencia el Sr. Pablo Valencia y Claudia de Valencia quienes nos brindaron alojamiento y protección, lo cual es invaluable, en especial en una zona con prácticas de narcotráfico y animales ponzoñosos. Sé que siempre estaré en deuda, muchas pero muchas gracias por todo.

A los Biol. Francisco Galicia Zamora y Elisa Villaseñor, por haber servido tan amablemente de enlace con el Sr. Pablo Valencia.

Mil gracias a los investigadores, colegas, estudiantes y amigos que apoyaron en la realización del trabajo en campo. Al maestro Xavier Madrigal y Biol. Consuelo Medina, gracias por su apoyo, en la identificación de las especies en campo y gabinete. A la Dra. Elvira Durán y al Biol. Rafael Mayorga por su apoyo y recomendaciones para la estructuración de la toma de información de campo. Al Dr. Lorenzo Vázquez por el aporte en la información geológica y geomorfológica de la zona de estudio. Al Biol. Camilo Alcántara quien siempre estuvo presente y su apoyo fue fundamental en la recopilación de la información de suelos. Al Biol. Gerardo Salazar, presente en la determinación del listado florístico del presente trabajo, el cual fue objeto de estudio de su tesis de licenciatura.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Sergio Zamudio, por su apoyo y hospitalidad brindada, para el uso de las instalaciones de Herbario del Instituto de Ecología (IEB), A.C. en Pátzcuaro.

Gracias por las asesorías brindadas en la parte de SIG's al Dr. Jean François Mas y Mtro. Antonio Navarrete. Al técnico en computación Hugo Zavala, por el apoyo brindado y a Katia Méndez Flores por agilizar todos los trámites en Posgrado.

Agradezco el soporte tan eficiente y amable que otorgaron Lic. Pedro Urquijo en el tema histórico y social; así como el apoyo brindado por el Dr. Francisco Bautista, Rosaura Páez y Estela Carmona en la información climatológica de la zona de estudio.

Finalmente a los amigos y compañeros, que aún cuando no hayan estado involucrados con el trabajo de tesis, su presencia es vital: a la Gabylonda, José, Rafa, Camilín, Yan, Ale, Faus, Fer, Consuelito, Jaquie y Ale Acosta, gracias por su amistad y presencia.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
Importancia de la relación relieve y distribución de las plantas	1
Contenido de la tesis	4
Antecedentes	6
Referencias	10
MODELADO DE LA DIVERSIDAD DE TIPOS DE VEGETACIÓN EN MÉXICO BASADO EN ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS	13
Resumen	13
Abstract	14
Introduction	15
Study area	17
Material and methods	19
Elaboration of vegetation diversity types maps	22
Elaboration of topographical attribute maps	23
Analysis of correlation between vegetation diversity types and topography	24
VDT modelling	24
Results and discussion	27
References	37
MARCO GEOGRÁFICO E HISTÓRICO DE LA ZONA DE ESTUDIO	45
Geología	46
Clima	47
Hidrología	52
Edafología	53
Cubierta vegetal	54
Marco histórico y uso del suelo en la zona	55
AGRADECIMIENTOS	60
Bibliografía	61

EVALUACIÓN DE LOS ERRORES DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN OBTENIDOS POR INTERPOLACIÓN.....	65
Abstract.....	66
Introducción.....	66
Materiales y métodos.....	72
Resultados.....	79
Discusión y conclusiones.....	88
Referencias	90
DISTRIBUCIÓN DE LAS ASOCIACIONES DE UN BOSQUE TROPICAL SECO CADUCIFOLIO A TRAVÉS DE GRADIENTES: RELIEVE, LITOLOGÍA Y SUELO DESDE UNA PERSPECTIVA FITOSOCIOLÓGICA Y ESPACIAL EN MICHOACÁN, MEXICO	95
Abstract.....	95
Resumen	96
Introducción.....	97
Marco conceptual	97
Metodología.....	100
Adquisición de la información de la vegetación	100
Diseño del muestreo y tamaño de la muestra	101
<i>Levantamiento florístico</i>	101
Levantamiento físico	102
Análisis tabular y estadístico de la vegetación	103
Resultados.....	108
Análisis tabular y estadístico de la vegetación	109
Discusión y conclusiones.....	129
Agradecimientos.....	134
Bibliografía.....	135

INTEGRACIÓN DE LOS ATRIBUTOS RELIEVE, LITOLOGIA Y SUELOS EN LA DINÁMICA Y ELABORACIÓN DE UN MODELO ESPACIO TEMPORAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE UN BOSQUE TROPICAL SECO CADUCIFOLIO	143
Introducción	143
Metodología	145
Elaboración de los mapas de vegetación y uso del suelo de 1993 y 2002	146
Elaboración del mapa de distribución potencial de las asociaciones de BTSC	147
Mejoramiento del mapa de cubierta vegetal y uso del suelo 1993 y 2002	153
Análisis de los cambios en las asociaciones del BTSC y otras cubiertas vegetales	153
RESULTADOS	154
Elaboración de los mapas de vegetación y uso del suelo de 1993 y 2003	154
Elaboración del mapa de distribución potencial de las asociaciones de BTSC	157
Mejoramiento del mapa de cubierta vegetal y uso del suelo 1993 y 2003	163
Análisis de los cambios en las asociaciones del BTSC y otras cubiertas vegetales	164
Discusión y conclusiones	168
Bibliografía	172
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	175
Ventajas del uso de variables de relieve derivadas de un MDE	178
Limitaciones del uso de variables de relieve derivadas de un MDE.....	180
Ventajas del enfoque fitosociológico.....	182
Limitaciones del enfoque fitosociológico.....	185
La representación geográfica (enfoque de modelado con SIG).....	186
Síntesis integral del trabajo de tesis	188
Uso de la información obtenida	191
BIBLIOGRAFÍA	193

LISTA DE TABLAS

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES 1

Tabla 1 – Características de estudios sobre la relación vegetación / relieve con base en MDE8

MODELADO DE LA DIVERSIDAD DE TIPOS DE VEGETACIÓN EN MÉXICO BASADO EN ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS 13

Table 1 - INEGI ,1980. Land use and vegetation cartography classification scheme (only natural land cover categories are indicated).....21

Table 2 - Pearson correlation coefficients for topographical variables calculated for 80 x 80 km² windows.....32

Table 3 - Sensitivity Analysis of the Neural Networks Model. The error indicates the performance of the network if that variable is "unavailable". The ratio reports the ratio between the RMS error and the baseline error (i.e. the error of the network if all variables are "available"). The rank simply lists the variables in order of importance (i.e. order of descending error).....33

MARCO GEOGRÁFICO E HISTÓRICO DE LA ZONA DE ESTUDIO 45

EVALUACIÓN DE LOS ERRORES DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN OBTENIDOS POR INTERPOLACIÓN..... 65

Tabla 1 - Programas utilizados en el presente estudio.....73

Tabla 2 - Clasificación de los valores de error83

DISTRIBUCIÓN DE LAS ASOCIACIONES DE UN BOSQUE TROPICAL SECO CADUCIFOLIO A TRAVÉS DE GRADIENTES: RELIEVE, LITOLOGÍA Y SUELO DESDE UNA PERSPECTIVA FITOSOCIOLÓGICA Y ESPACIAL EN MICHOACÁN, MEXICO95

Tabla 1 - Resultado del análisis de cúmulos mostrando la afinidad florística (TWINSPAN PCORD), determinando cuatro asociaciones en BTSC a partir de las especies características o diagnósticas. Las asociaciones aparecen colocadas en orden decreciente en relación a la altitud, asociación A (> 930 m.s.n.m.), B (350-790 m.s.n.m.), C (350-790 m.s.n.m.) y D (< 400 m.s.n.m.). N. D.* Especie no determinada. Los números corresponde a los rangos del porcentaje de cobertura 1= < 5%; 2 = 6%-10%; 3= 11%-20%; 4= 21%- 40% y 5= >41%. Las especies acompañantes y accidentales aparecen en anexo (Tabla 2). 112

Tabla 2 - Variables ambientales representadas de forma cualitativa. La numeración corresponde a un valor jerárquico. *El número mayor corresponde a una mayor concentración de humedad, ** el número mayor corresponde a mayor cantidad de radiación, ***el número mayor corresponde a un mayor porcentaje de arena y **** el número mayor corresponde a mayor perturbación. Las clases texturales fueron agrupadas con base en el contenido del porcentaje de arena..... 115

Tabla 3 - Valores de correlación significativa obtenidos a través del análisis de CCA. (BRAAK.,1986). Aquí no presentó correlación significativa andesita..... 117

Tabla 4 - Coeficiente de correlación entre variables, donde el único valor alto aparece en negritas. 119

Tabla 5 - Agrupación de los valores de las variables con correlación significativa en CCA excepto litología por ser una variable cualitativa. 119

Tabla 6 - Muestra los datos de fidelidad de las cuatro asociaciones A, B, C y D. Los números romanos indican el grado de frecuencia o presencia de las especies con respecto a las diferentes asociaciones: I. 0-20%; II. 21-40%; III. 41-60%; IV. 61-80% y V. 81-100%; y los números arábigos la vitalidad de la vegetación (a mayor número mayor vitalidad). 123

Tabla 7 - Descripción de las condiciones ambientales que influyen en la distribución de las asociaciones del BTSC 128

INTEGRACIÓN DE LOS ATRIBUTOS RELIEVE, LITOLOGIA Y SUELOS EN
LA DINÁMICA Y ELABORACIÓN DE UN MODELO ESPACIO TEMPORAL
DE LA DISTRIBUCIÓN DE UN BOSQUE TROPICAL SECO CADUCIFOLIO.... 143

Tabla 1 - Valores de correlación significativa obtenidos a través del análisis de CCA..... 152

Tabla 2 - Valores de pertenencia de los tipos de roca para representar el comportamiento de la función de pertenencia..... 157

Tabla 3 - Valores de superficie en ha y en % de las diferentes cubiertas vegetales en la microcuenca de San José de Chila para 1993 y 2002. 165

Tabla 4 - Superficie, cambio neto y de tasa de deforestación para la cubierta vegetal y uso del suelo en la microcuenca de San José de Chila para los años 1993 y 2002 166

Tabla 5 - Superficie, cambio neto y de tasa de deforestación para las diferentes asociaciones de BTSC en la microcuenca de San José de Chila para los años 1993 y 2002 167

LISTA DE FIGURAS

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	1
MODELADO DE LA DIVERSIDAD DE TIPOS DE VEGETACIÓN EN MÉXICO BASADO EN ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS	13
Figure 1 - Shadowed digital elevation model relief of Mexico. The azimuth angle and the angle above the horizon of the Sun were set at 315 and 45 degrees respectively.	19
Figure 2 - Land use and vegetation map (source: Series I, National Institute of Geography, Statistics and Informatics INEGI). A reclassification was made merging vegetation types that belong to the same broadened class; This classification was named subformation level and specifically developed for the purpose of this paper. Sources: Series I, INEGI, 1980.	20
Figure 3 - Schematic illustration of the MLP, with one input layer, one hidden layer and one output layer. In this illustration these layers comprise 4, 8 and one neuron(s) respectively. The right-hand side of the figure shows the data set to be used in order to train this network. I_1 , I_2 , I_3 , and I_4 are the input topographical variables, O_1 is the output variable (vegetation diversity) and, S_1 , S_1 , S_1 , ... are the observation data derived from each observation (pixel) on the topographical attributes and the vegetation diversity maps.	26
Figure 4 - Determining the optimal window size. The figure shows the correlation between Vegetation Diversity Types and several topographical attributes at different window size analyses. The error bar represents the 95 % confidence interval of the coefficient.....	29
Figure 5 - Vegetation diversity types index derived from different size windows. The figure shows the boundaries of the polygons of the vegetation types map along with a grey-scale representation of the vegetation types diversity. A dark pixel corresponds to a low diversity value. With 1 x 1 km ² windows, the variation of the estimate of vegetation types diversity is strongly related to edge proximity. This “edge effect” disappears with 80 x 80 km ² window sizes.	30
Figure 6 - Map of vegetation diversity type patterns obtained from topographical attributes.....	34
Figure 7 - Model error spatial distribution. The bias is calculated as the “true” vegetation diversity types minus modelled vegetation diversity types. No data corresponds to areas which present less than 70% of natural vegetation and where the true VTDP was not calculated.....	34

MARCO GEOGRÁFICO E HISTÓRICO DE LA ZONA DE ESTUDIO 45

Figura 1 - Localización del área de estudio..... 45

Figura 2 - Localización de las 5 estaciones climatológicas en orden ascendente altitudinalmente: Los Panches, 180 m.s.n.m (**126**); Piedras Blancas, 334 m.s.n.m (**67**); Punta de Agua 430 m.s.n.m (**131**); Apatzingán, 682 m.s.n.m (**7**); Aguililla, 970 m.s.n.m (**5**). Línea azul corresponde a la microcuenca de San José de Chila..... 48

Figura 3 - Gráficas de climogramas donde se resalta el inicio y final de la longitud del periodo de crecimiento y su relación con los procesos de evapotranspiración..... 51

EVALUACIÓN DE LOS ERRORES DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN OBTENIDOS POR INTERPOLACIÓN 65

Figura 1 - Diagrama de flujo mostrando los principales procesos del estudio..... 74

Figura 2 - Métodos de interpolación lineal. Para determinar el valor de elevación del píxel interpolado (cuadro rojo), ILWIS y New-miel usan las distancias mínimas a las curvas de nivel inferior y superior (d_i y d_s en azul) mientras que IDRISI utiliza distancias en direcciones preestablecidas (en verde). La curva de 150 m forma una región cerrada con un punto acotado (a 167 m)..... 75

Figura 3 - Método de Hutchinson para determinar la resolución óptima para la interpolación. Se observa un quiebre de la curva para la resolución 9 que se considera como la más adecuada. Modificado de Hutchinson (1996). 78

Figura 4 - Error medio cuadrático de los MDE obtenidos por los cuatro programas a diferentes resoluciones. La leyenda corresponde: cv= curvas; cv y ptos = curvas y puntos. 80

Figura 5 - Determinación de la resolución óptima para la interpolación. De acuerdo a Hutchinson (1996), la figura sugiere que la resolución más idónea es de 30 m. (interpolaciones realizadas con el algoritmo ANUDEM en ARC/INFO). 81

Figura 6 - Gráficas comparativas del error medio cuadrático entre los cuatro programas para la resolución de 30 m. La leyenda corresponde: CV= curvas; CV Y PTOS = curvas y puntos; y CV Y RÍOS = curvas y ríos. 82

Figura 7 - Histograma de frecuencia de los valores de error. El pico correspondiente a valor de error nulo corresponde a los píxeles de las curvas de nivel. 83

Figura 8 - Distribución espacial del error (reagrupado en cinco categorías) de los MDE obtenidos utilizando diferentes programas e insumos en una resolución de 30m. 85

Figura 9 - Ubicación del perfil dentro del área de estudio..... 86

El perfil para ARC/INFO (Figura 9) mostró que el algoritmo utilizado para interpolar curvas y puntos acotados, trata de generar perfiles que pasen por los puntos cuya elevación es conocida (curvas y puntos acotados) con poca curvatura. La introducción del punto acotado incrementó considerablemente los errores con un error positivo que alcanzó hasta 60 m (con la interpolación sólo con curvas este error era de 21 m) y un error negativo de hasta -22 m mientras los producidos solo con la interpolación con curvas de nivel fue -9 m (Figura 10). 86

Figura 10 - Gráficas del perfil que representan las diferencias altitudinales entre los DEMs interpolados en los diferentes programas con una resolución de 30 m y el DEM de referencia. 87

DISTRIBUCIÓN DE LAS ASOCIACIONES DE UN BOSQUE TROPICAL SECO CADUCIFOLIO A TRAVÉS DE GRADIENTES: RELIEVE, LITOLOGÍA Y SUELO DESDE UNA PERSPECTIVA FITOSOCIOLÓGICA Y ESPACIAL EN MICHOACÁN, MEXICO95

Figura 1 - Dendograma resultado del análisis en TWINSpan (Análisis divisivo), los valores en los corchetes representan los valores de disimilitud. Se distinguieron cuatro asociaciones. 110

Figura 2 - Gráfica resultado del Análisis Canónico Discriminante, en la cual se muestra que la separabilidad de las cuatro asociaciones es clara (círculos en línea punteada). Ver tabla 1 para los nombres de las asociaciones. Los círculos negros corresponde a las especies diagnosticas, y los círculos azules corresponden a especies accidentales, acompañantes y/o indiferentes. La información en color gris muestra algunas de las características ambientales de las respectivas asociaciones y permite realizar hipótesis acerca de la zona de estudio. 114

Figura 3 - Diagrama de ordenamiento derivado del Análisis de Correspondencia Canónico, mostrando la correlación entre las variables ambientales y las asociaciones vegetales en la zona de estudio..... 118

INTEGRACIÓN DE LOS ATRIBUTOS RELIEVE, LITOLOGIA Y SUELOS EN LA DINÁMICA Y ELABORACIÓN DE UN MODELO ESPACIO TEMPORAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE UN BOSQUE TROPICAL SECO CADUCIFOLIO.... 143

Figura 1 - Expresión de la pertenencia a “bosques cerrado” en lógica Booleana (izquierda) y difusa (derecha).....	149
Figura 2 - Diagrama de Flujo de los pasos metodológicos para el modelado de la distribución del BTSC.	150
Figura 3 - Diagrama de flujo de los reglas difusas para la obtención del mapa de vegetación potencial de las asociaciones del BTSC.....	151
Figuras 4 y 5 - Mapas de la cubierta vegetal en la microcuenca de San José de Chila para los años 1993 y 2002, elaborados a partir de ortofotos de fotografías aéreas e imágenes de satélite SPOT respectivamente.	156
Figura 6 - Asociación A J-shape simétrica correspondiente a la asociación A....	158
Figura 7 - Asociación D J-shape decreciente correspondiente a la asociación D	159
Figura 8 a y b - Mapa difusos de pertenencia de la altitud y la geología a la asociación D del BTSC donde los valores más altos de pertenencia a esta asociación aparecen con el valor 1.00 (tono rosa fiusha).....	160
Figura 9 - Mapa resultado de la sobreposición de los mapas difusos de litología y altitud de la asociación D.....	161
Figura 10 - Modelo espacial de distribución de las asociaciones de vegetación potencial en el BTSC derivados a través de métodos de lógica difusa.	162
Figura 11 - Mapa mejorado a través de la adición de la información resultante de los procesos difusos en el BTSC en el mapa de cubierta de uso del suelo y vegetación de 1993, las letras minúsculas “c” y “a” corresponden a BTSC “c” conservado y “a” alterado.....	163
Figura 12 - Representación gráfica de las superficies de los diferentes tipos de cubierta vegetal en la microcuenca de Chila para los 1993 y 2002.....	165

LA CONTRIBUCIÓN DE LOS ATRIBUTOS DEL RELIEVE PARA EXPLICAR LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA VEGETACIÓN: ESTUDIO DE CASO EN UNA ZONA DE MONTAÑA DE ALTA DIVERSIDAD

INTRODUCCIÓN

Importancia de la relación relieve y distribución de las plantas

Desde principios del siglo XIX es conocido que las condiciones del medio natural contribuyen en la distribución geográfica de la vegetación (Humboldt y Bonpland, 1807; de Candolle, 1855). El relieve forma parte de ese medio natural y juega un papel fundamental en la distribución de la vegetación, particularmente en áreas de montaña.

Se ha mencionado que existe una estrecha relación entre el relieve y la distribución de la vegetación, debido a las variaciones que el primero genera en el ambiente como son: la distribución de la temperatura, precipitación, viento, radiación, uso del suelo y humedad del suelo, entre otros (Hoers et al., 2002; Neldner et al., 1997; Raupach y Finiggan, 1997). Por ejemplo el relieve es el principal factor que modifica la distribución de la insolación. La variabilidad en elevación, pendiente y orientación de la superficie así como la obstrucción de la radiación solar por las características topográficas circundantes crea fuertes gradientes de insolación a nivel local (Fu y Rich, 2002).

Por otro parte, en años recientes el desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido la adquisición de información de la elevación del relieve, la cual

cubre la superficie total de nuestro planeta, presenta resoluciones más finas y mayor calidad de los datos. La disponibilidad de dichos datos ha despertado el interés de su uso y manejo, por diferentes ramas del conocimiento: ciencias de la tierra, matemáticas, ingeniería y ciencias computacionales, creando modelos donde la superficie terrestre sea continua y a partir de ella, generar nuevos y diversos productos útiles en el análisis de otras disciplinas científicas (Pike, 2000). Tal es el caso de la morfometría del relieve (pendiente, rugosidad, curvatura, longitud de laderas, radiación solar, humedad del suelo...) o la hidrología (generación de la red fluvial, orden de corrientes...).

Por lo anterior, el manejo de Modelos Digitales de Elevación (MDE) y de Sistemas de Información Geográfica es de suma importancia para el análisis de la información espacial de las ciencias ambientales. Y desde este punto de vista, el presente trabajo consideró de gran interés determinar: “Cual es la influencia de los atributos del relieve en la distribución de la vegetación, primero a una escala regional (todo el país) y posteriormente a una escala local”

En lo que respecta a la escala local el presente trabajo se enfocó en una microcuenca enclavada en la porción sotavento de la Sierra Madre del Sur en el estado de Michoacán. En ella predomina un paisaje montañoso que, al igual que la mayoría de los paisajes montañosos a nivel global, mantienen una alta diversidad relacionada con la compresión de climas debido al gradiente altitudinal, creando una diversidad de habitat en espacios pequeños. Por tanto reconocidos como los ecosistemas más diversos por unidad de área. Sin embargo, los ecosistemas montañosos son sistemas frágiles porque presentan pronunciadas pendientes y suelos muy delgados, que al ser modificados por las diferentes actividades humanas (agricultura, prácticas forestales inapropiadas e industria extractivas) dejan gran deterioro en dichos ecosistemas (Corner y Spehn, 2002).

En la microcuenca de estudio predomina una cubierta vegetal de Bosque Tropical Seco Caducifolio (BTSC), el cual ha sido reconocida como una comunidad con alta biodiversidad, pero también se ha evaluado como una de las cubiertas vegetales que ha sufrido mayores procesos de deforestación en las últimas décadas (Trejo, 2000 y Mas et al., 2004). De forma particular el BTSC de la zona de estudio ha sido identificado por especialistas, como parte de la región con mayor diversidad de especies entre todos los BTSC del país.

En los últimos 30 años, el interés y la investigación en los BTSC se ha incrementado, generando conocimiento en diversos temas (Maass et al., 2002), pero destaca la carencia de investigación de corte sinecológico. Este conocimiento, es sin duda fundamental para apoyar acciones de buen manejo y conservación. Y por ello, la utilización de métodos aún no aplicados en BTSC (métodos fitosociológicos), así como herramientas de vanguardia como Modelos Digitales de Elevación (MDE), se muestran como herramientas valiosas para explorar, las cuales permitan obtener resultados desde otras perspectivas científicas, que apoyen en el conocimiento de la composición florística y la identificación de variables ambientales relacionadas en la distribución espacial de las comunidades del BTSC.

Por otro lado los BTSC en México, corresponden a regiones con un alto retraso económico y abandono social, lo que implica un gran compromiso de la comunidad académica para generar el conocimiento científico que sirva de base para crear propuestas de restauración, conservación y uso de los recursos naturales en beneficio de la población, pero en un contexto armónico con la naturaleza.

El primer capítulo de la tesis corresponde a la introducción y los antecedentes, en la cual se documentan trabajos que abordan la relación entre la distribución de la vegetación y el relieve a través del uso de MDE en

diferentes tipos de cobertura, ya que casos en BTSC son muy escasos. Así mismo, también se toman en cuenta trabajos que relacionaron la distribución de BTSC con algunas variables ambientales a nivel mundial y para el caso de México. Destacan numerosas y valiosas contribuciones científicas llevadas a cabo en las últimas tres décadas, resaltando los estudios del BTSC en la reserva de la Biosfera de Chamela - Cuixmala en el estado de Jalisco.

Este trabajo muestra el papel que juega el relieve en los patrones de distribución espacio-temporales de la vegetación a escalas regional y local. El estudio integró tres enfoques: el primero compete al estudio del relieve *per se*, utilizando Modelos Digitales de Elevación (MDE). El segundo enfoque aborda el tema de análisis fitosociológico. El tercero integra herramientas de análisis de redes neuronales, pruebas multivariadas y métodos de lógica difusa para entender el peso ponderado que tienen las variables y su distribución espacial.

CONTENIDO DE LA TESIS

El primer capítulo pretende mostrar un panorama a nivel nacional de la importancia de la relación entre la diversidad de tipos de vegetación y los atributos topográficos (altitud, rango de elevación, pendiente, rugosidad y exposición). Representa, la primera aproximación a nivel nacional de representar la diversidad espacial de las comunidades vegetales a partir de variables indirectas, como lo es el relieve. La diversidad de los tipos de vegetación fue calculada a través del índice de Simpson, el cual fue correlacionado con los atributos del relieve. En este apartado se modeló la diversidad de tipos de vegetación mediante métodos de redes neuronales. Los resultados fueron evaluados con la información original de los tipos de vegetación cuantificando el desempeño de la confiabilidad del modelo.

En el segundo capítulo se describe la zona de estudio desde dos perspectivas: geográfica e histórica. Todo ello con la finalidad de comprender en un marco más amplio los procesos que han ocurrido en la zona de interés, así como el papel que juegan la ubicación, geología, climatología, edafología y tipos de vegetación en el uso o desuso de los recursos. Las características anteriores se encuentran ligadas a las condiciones sociales, políticas y económicas del país en diferentes momentos históricos.

En el capítulo tercero se presenta el paso preliminar antes de establecer la relación entre la distribución de la vegetación de las comunidades vegetales del BTSC y los atributos del relieve, a través de la evaluación de la información de los MDE, obtenidos por procesos de interpolación en cuatro diferentes programas (ILWIS, IDRISI, NEWMIEL y ARCINFO). Dicha evaluación se basó en la comparación del error medio cuadrático de los MDE obtenidos por cada uno de los programas y de un MDE de referencia (imagen ASTER), todo ello con el objeto de obtener un MDE de calidad, que por consecuencia permitió que la información de los atributos del relieve fuera más apegada a la realidad en el terreno.

En el cuarto capítulo se analiza la relación entre la distribución de la vegetación de las comunidades vegetales del BTSC y los atributos del relieve, desde el enfoque fitosociológico, el cual permitió establecer y diferenciar asociaciones vegetales en el BTSC para la zona de estudio a través de análisis estadísticos en TWISPAN y Análisis Discriminante Canónico, así como también determinar los atributos del relieve que establecieron la distribución de asociaciones vegetales del BTSC llevando a cabo Análisis de Correspondencia Canónica, pruebas de Chi², G y Monte Carlo que en la mayoría de los casos fueron realizados en el programa PCORD.

En el último capítulo, se utilizan los atributos del relieve que resultaron con una buena correlación en las diferentes asociaciones del BTSC. Esto, con la finalidad de modelar la distribución espacial de las asociaciones vegetales a través de procesos de métodos de lógica difusa en el programa IDRISI. Este modelo se combinó con mapas obtenidos mediante la interpretación visual de ortofotos e imágenes de satélite, los cuales fueron mejorados al adicionar los atributos del relieve que se relacionaron con la distribución de las asociaciones.

Finalmente, en la última parte del documento se presentan la discusión y conclusiones del trabajo de tesis. El objetivo a futuro del presente trabajo es, a partir del conocimiento espacial de la vegetación de un BTSC, sentar las bases para posteriores proyectos de conservación, restauración y uso sustentable en los BTSC.

ANTECEDENTES

En la tabla 1, se presentan de forma sintética, las características de algunos trabajos en los cuales los autores estudiaron la relación de la distribución de la vegetación con los atributos del relieve. Se valió: cuáles atributos del relieve se utilizaron; si fueron derivados o no de un modelo digital de elevación (MDE); si se utilizaron otras variables además de las del relieve; qué atributo de la vegetación se consideró (distribución de una especie, tipo de vegetación, índice de diversidad...); en qué tipo de ambiente se llevó a cabo el estudio; cuáles variables resultaron relacionadas con la vegetación; y, finalmente, si él o los autores desarrollaron algún modelo espacial (cartográfico) con base en los resultados obtenidos.

Aunque la mayoría de los estudios de esta índole se llevaron a cabo en ambientes templados, se escogieron sobre todo estudios realizados en ambientes tropicales para elaborar esta tabla. Los atributos del relieve, en particular la elevación, fueron variables que se encuentran fuertemente relacionadas con la vegetación. Sin embargo, otras variables, en particular la geología, son reportadas como muy importantes en la mayoría de los estudios.

Finalmente, se puede notar que en varios estudios los atributos del relieve no se derivan de un MDE, sino son evaluados en campo y sobre todo que la gran mayoría de los estudios no se derivan en un producto espacializado (modelo espacial o mapa). Algunos aspectos notables de estas contribuciones serán abordadas en los siguientes capítulos.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

Tabla 1 – Características de estudios sobre la relación vegetación / relieve con base en MDE

Autor(s) y año	Variabes Relieve	Otra(s) Variable(s)	Tipo / atributo de vegetación	Relieve	Ambiente y lugar	Variabes relacionadas con vegetación	Existencia de un modelo espacial
Austin et al., 1983	Latitud y longitud, elevación, pendiente, orientación * + P, T°, insolación	Geología	6 especies de eucaliptos	150 a 2125 m	Diversos sitios de Australia	Elevación y dependiendo de la especie Precipitación, insolación, geología	<i>no</i>
Davis y Goetz, 1990	Pendiente, exposición, insolación	Geología	Una especie: Quercus agrifolia	colinas	California, clima mediterráneo seco (P=360mm)	Geología más correlada, las demás significativas	<i>Modelo de distribución de Q. agrifolia</i>
Oliveira-Filho et al., 1994.	Altitud *	Propiedades del suelo y topografía	Bosque de Galeria, Rio Grande	laderas de Valles y Barrancos	Rio Grande, Minas Gerais, Brasil.	Propiedades químicas Ca, Mg, K y Ph, rasgos topográficos	<i>no</i>
Del Bon Espírito-Santo et al., 2002	Altitud	Variabes de físicas y Químicas del suelo	Bosque tropical seco subcaducifolio	Laderas 910 -940 m	Minas Gerais, Brasil	Altitud, saturación de bases, y contenido de arenas limos y arcillas	<i>no</i>
Oliveira-Filho et al., 1998	<i>Altitud *</i>	<i>Topografía, propiedades del suelo, espacios en dosel, y vegetación leñosa</i>	<i>Bosque tropical seco caducifolio</i>	<i>Laderas (360- 375 m)</i>	<i>Centro de Brasil</i>	<i>Área de espacios en el dosel y el gradiente suelo topografía</i>	<i>no</i>

Autor(s) y año	Variables Relieve	Otra(s) Variable(s)	Tipo / atributo de vegetación	Relieve	Ambiente y lugar	Variables relacionadas con vegetación	Existencia de un modelo espacial
Pyke et al., 2001	Altitud *	Precipitación, geología, topografía y suelos	Bosque Neotropical	Tierras bajas	Canal de Panamá	Tendencia de la precipitación, geología y atributos locales del suelo	no
Dalberg, 2006	Altitud	Variabes físicas y químicas del suelo	Pteridofitas terrestres, Hierbas angiospermas terrestres y palmeras	Tierras bajas (250-300 m)	Bosque tropical húmedo, Brasil	Altitud, contenido de calcio y contenido de arena	no
Villers-Ruiz et al., 2003	Altitud	Altitud, geología, tipo de suelo, temperatura y precipitación total	Bosque tropical seco caducifolio y matorral xerófito	Montañas, colinas, piedemonte, planicies aluviales.	Los Cabos, Baja California	Altitud, precipitación, temperatura y geología.	no
Hoersch et al., 2002	Altitud	Altitud, pendiente, exposición, radiación y curvatura	Bosque de coníferas, Bosques mixtos y bosques deciduos	Montañas, piedemonte y planicies	Alpes, Suiza	Altitud, pendiente, exposición, radiación y curvatura	no
Lassueur et al., 2006	Altitud	Pendiente, exposición, curvatura en planta y perfil	Bosque de coníferas, Bosques mixtos y bosques deciduos	Montañas, piedemonte y planicies	Alpes Suiza	Pendiente y exposición	no
Balvanera et al., 2002	Elevación*, pendiente, orientación, insolación	Disponibilidad de agua	Bosque tropical seco caducifolio, diversidad β		Chamela, Jalisco, México	Insolación, pendiente y elevación	no

* Casos en los cuales los atributos de relieve no se obtuvieron de un MD

REFERENCIAS

Austin, M.P., Cunningham, R.B. y Good, R.B. 1983. Altitudinal distribution of several eucalypt species in relation to other environmental factors in southern New South Wales. *Australian Journal of Ecology*. 8:169-180.

Balvanera, P., Lott, E., Segura, G., Siebe, C. E islas, A. 2002. Patterns of β -diversity in a Mexican tropical dry forest. *Journal of Vegetation Science* 13: 145-158.

Davis, F.W. y Gotees, S. 1990. Modeling vegetation pattern using digital terrain data. *Landscape Ecology* 4(1): 69-80

Del bon, F., Teixeira de Oliveira, A., Mendonça, E., Santos, J., Leite, M., & Granate de Sá, J.J. 2002. Variáveis ambientais e a distribuição de espécies arbóreas em um remanescente de floresta estacional semidecídua montana no campus da universidade federal de lavras, M.G. *Acta bot. Bras.* 16(3): 331-356.

Hoersch, B., Braun G. y Schmidt, U. 2002. Relation between landform and vegetation in alpine regions of Wallis, Switzerland. A multiscale remote sensing and GIS approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26:113-139.

Körner, C.H. y Spehn E.M. 2002. Mountain biodiversity: a global assessment. Pantheon, London.

Lassueur, T.; Joost, S. y Randin, C.F. 2006. Very high resolution digital elevation models : Do they improve models of plant species distribution?. *Ecological Modelling*, 198: 139-153.

Mass, J. M., Jaramillo, A., Martínez-Yeizar, F., García-Oliva, F., Pérez-Jiménez, L. A. y Sarukhán, J. 2002. Aspectos funcionales del ecosistema de selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco. Pag. 525-542. En: Noguera, F. A.; Vega, J.H.; García-Aldrete, A.N. y Quesada, M. editores. Historia Natural de Chamela. Instituto de Biología, UNAM, México.

Mas, J.F., Velásquez, A, Díaz-Gallegos, J.R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., Castro, R., Fernández, T. y Pérez-Vega, A. (2004) Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4):249-261.

Oliveira-Filho, A.T., Curi, N., Vilela, E., y Carvalho, D. 1998. Effects of Canopy gaps, topography and soils on the distribution of woody species in Central Brazilian deciduous dry forest. *Biotropica*. 30: 362-375.

Pyke, C. R., Condit, R., Aguilar, S. y Lao, S. 2000. Florist composition across a climatic gradient in a neotropical lowland forest. *Journal of Vegetation Science*. 12: 553-566.

Trejo, I. 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation* 94: 133-142.

Villers, L., Trejo, I. y Lopez, J. 2003. Dry vegetation in relation to the physical environment in the Baja California Peninsula; México. *Journal of Vegetation Science* 14: 517-524.

MODELADO DE LA DIVERSIDAD DE TIPOS DE VEGETACIÓN EN MÉXICO BASADO EN ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS *

Resumen

Se evaluó el papel que juega la topografía como variable sustituta para explicar los patrones de diversidad de tipos de vegetación (DTV). Se calculó el índice de diversidad de vegetación de Simpson para todo el país utilizando mapas de uso del suelo y vegetación a través un Sistema de Información Geográfica.

En un paso siguiente, se calculó la correlación entre la diversidad de vegetación y algunos atributos topográficos (altitud, rango de elevación, pendiente, rugosidad y exposición). Se encontró una correlación significativa entre las variables topográficas y la diversidad de vegetación (Coeficiente de Spearman > 0.4 , $p = 0.01$ con 3 variables: rango de elevación, promedio de elevación y pendiente).

Posteriormente, se buscó modelizar los DTV con base en los atributos topográficos usando un enfoque de redes neuronales artificiales. La comparación entre el mapa de los DTV modelizados y el mapa de los DTV reales, mostró que el modelo presentó una buena estimación de la diversidad de vegetación. El análisis de los errores sugiere que los DTV no pueden explicarse totalmente por atributos topográficos, aunque estos juegan un papel fundamental en los DTV a escala regional y continental.

Resultados de varias investigaciones mostraron, que las coberturas del suelo y la vegetación reflejan los patrones de distribución de la biodiversidad. Por

* Pérez-Vega, A.; Mas, J.F.; Velázquez, A. y Vázquez, L., 2008, Land cover diversity patterns in Mexico based upon topographic features, *Interciencia*, Vol. 33 (2): 88-95.

ello la modelización de los DTV es un enfoque prometedor para evaluar la biodiversidad. La conclusión principal es que las variables topográficas, disponibles actualmente en diferentes escalas de resolución para la mayor parte del mundo, pueden ser utilizadas para representar los patrones regionales de biodiversidad. Este último aspecto es crucial en países tropicales, los cuales presentan una alta biodiversidad pero frecuentemente carecen de bases de datos sobre coberturas del suelo confiables y actualizadas.

Abstract

The role played by topography as a surrogate variable to explain vegetation diversity types (VDT) was evaluated. Using a Geographic Information System, a Simpson vegetation diversity index for entire Mexican territory was computed based on land use and vegetation maps. Then, the correlation between VDT and topographical attributes (elevation, range of elevation, slope, roughness and diversity of aspect) was calculated using different sizes of analysis windows. A significant correlation between topographical variables and vegetation diversity was found (Spearman coefficient of correlation > 0.4 , $p = 0.01$ with 3 variables, elevation range, average elevation and slope), with an optimal window of 80 x 80 km.

Subsequently, an attempt was done to model VDT from the topographical attributes using an Artificial Neural Networks approach. The comparison between the modelled and the observed VDT maps showed that the model produced a rather good estimate of vegetation diversity. From error analysis it may be deduced that VDT cannot be totally explained by topographical attributes alone, although these play a primary role in VDT at regional to continental scale.

As research outcomes have proved that land cover and vegetation accurately portrays biodiversity distribution patterns, VDT modelling is a promising approach to assess biodiversity. A core conclusion is that topographical variables, currently available globally at a 3-arc-second resolution (approximately 90 meter) through the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) project, may be used to portray regional biodiversity patterns. This is crucial in tropical countries that harbour high biodiversity but often lack accurate and updated land cover databases.

Keywords: vegetation diversity, artificial neural networks, DEM, Mexico.

Palabras claves: patrones de diversidad de la vegetación, redes neuronales artificiales, MDE, México.

INTRODUCTION

Thorough documentation of habitat patterns is crucial to understand long term biogeographical and ecological processes; to reconcile alternatives between productive systems and maintenance of environmental services; to establish protected areas for conservation, to optimize allocation of financial support to natural resource management, and ultimately to reach ecologically sound rural development, without compromising socio-cultural justice and rights (Brechin et al., 2003). Mayr (2000) clearly documented the unprecedented rates of loss of biodiversity. Habitat deterioration, by most accounts, tops the list of threats to biodiversity (Wilshusen et al., 2002). Habitat mapping, therefore, has become a critical issue (e.g., in journals such as *Biodiversity Conservation*, *Conservation Biology*, *Nature* and *Science*). Biodiversity databases usually over-represent a few species records and largely misrepresent the environmental heterogeneity prevailing in tropical countries (Terborgh et al., 2002). Models of species distribution are based on

overlapping climate, geology, elevation and land cover patterns (Ceballos et al., 2005) and are confronted to the problem of the scale of inputs data as well to the unevenness of biodiversity measurements. Currently abundant literature describes species distribution patterns and its relation with environmental variables (see conservation biology and biodiversity and conservation journals www.jstor.org/journals and www.springer.com/west/home). Second level biodiversity patterns, especially cartographical portrayed are scanty. Research has shown that vegetation diversity types accurately portrays biodiversity distribution patterns (Burnett et al., 1998; Priego-Santander et al., 2004). Geomorphology, in turn, has been pinpointed as a key attribute to understand land cover distribution patterns (Harner and Harper 1976), as tested in the USA (Nichols et al., 1998; Coblenz and Riitters, 2004) and in Germany (Müller et al., 2004). The latter author state that biodiversity patterns are predictable based upon existing topographic data. Rather than simply acknowledging that biodiversity may be explained by geomorphology alone, it is crucial to evaluate how much of the VDT is controlled by measurable aspects of the topographic "character" of the landscape. These types of studies are yet to be conducted and are urgently needed in Neotropical countries (Mas et al., 2004b). In addition, the degree of certainty in predicting VDT ought to be measured in order to assess model performance.

The Artificial Neural Networks (ANN) are non-linear mapping structures based on the function of the human brain. Advantages of the ANN approach include the ability to handle non-linear functions which relate input (exploratory) variable (s) and output (dependent) variables, to perform model-free function estimation, to learn from data relationships that are not known otherwise and to generalize to new situations. ANNs have been shown to be universal and highly flexible function approximators for any data. Therefore, ANNs make powerful tools for models, especially when the underlying data relationships

are unknown (Lek et al., 1996; Lek and Guégan, 1999). The application of ANNs in environmental sciences is increasingly common. Some recent utilizations are models predicting species distribution, abundance or diversity as a function of environmental variables (Lek-Ang et al., 1999; Manel et al., 1999, Foody and Cutler, 2006), land use/cover distribution modelling (Mas, 2004), rice crop damage by flamingos (Tourenq et al., 1999), streamflow and flash floods (Kim and Barros, 2001), and ecosystem characteristics from remotely sensed data (Jensen et al., 1999; Paruelo and Tomasel, 1997). Nonetheless, few applications have been reported in the literature aimed at predicting land cover and vegetation patterns (Hilbert and Ostendorf, 2001; Aitkenhead et al., 2004; Come et al., 2004). Due to their characteristics ANNs are promising to predict complex and spatially explicit patterns such as vegetation diversity.

The objective of this paper is twofold. First, it aims at testing the use of topographical features to predict vegetation diversity in Mexico. Second, it uses ANN to best model types vegetation diversity.

STUDY AREA

Mexico encompasses a continental territory of nearly two million square kilometers and is one of the five biologically richest countries, therefore considered as megadiverse (Groombridge and Jenkins, 2000). A combination of topographic, geologic and climatic factors have contributed to its exceptional biodiversity. It comprises complex geomorphologic patterns and heterogeneous topography (Lugo, 1990), as it can be observed in Figure 1. This complexity, along with the variety of climates and cultural history of Mexico, have been considered as key attributes to explain the formation of a mosaic of environmental conditions that enabled the evolution of a large variety of habitats and lifeforms. A transitional biogeographic zone runs

through Mexico forming a bridge between the Nearctic (North American) and Neotropical (Central and South American) realms. This transitional zone was formed when the land masses of North and South America made contact through the emergence of the Isthmus of Panama approximately five million years ago (Haug and Tiedemann, 1998). As a result, Mexico represents a compound biogeographical area, where rich mixtures of fauna and flora with different biogeographical filiations meet. In addition, Mexico has experienced severe climatic changes in the past. During the late Quaternary the entire territory was episodically under the influence of colder climates, drier in the central and southern parts, and moister in the northern part (Metcalf et al., 2000); glaciers formed on the high mountains (Vázquez-Selem and Heine, 2004); and vegetation communities experienced marked changes and geographic shifts (e.g. Lozano-García et al., 2005). This enabled the movement of many species and at the same time caused the extinction of many tropical species in a large part of their original areas of distribution, forcing them to restricted zones where conditions remained favourable. This isolation resulted in new species, which, in many cases extended the areas of distribution after the glaciers receded. This process produced a considerable increase in the number of relatively new and endemic species.

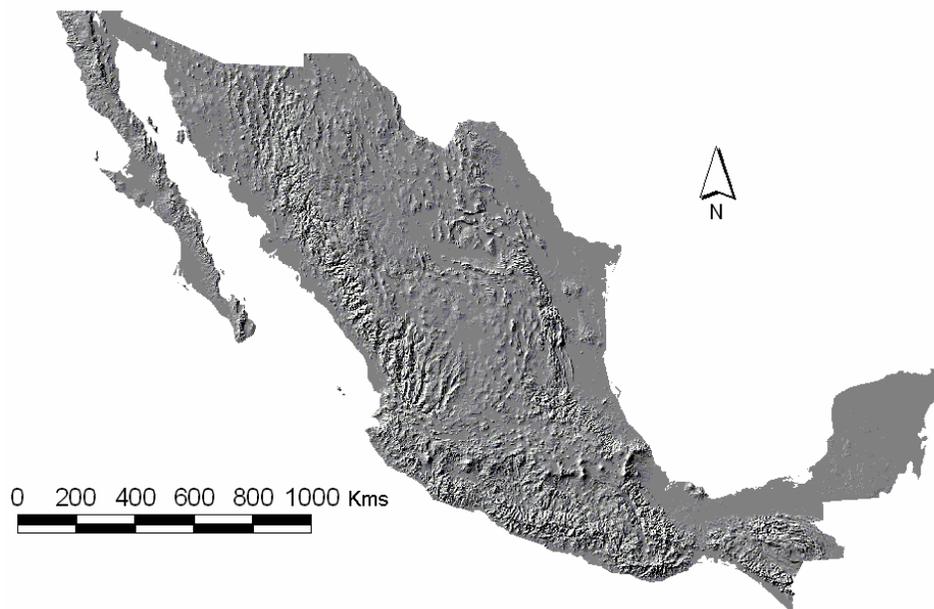


Figure 1 - Shadowed digital elevation model relief of Mexico. The azimuth angle and the angle above the horizon of the Sun were set at 315 and 45 degrees respectively.

MATERIAL AND METHODS

In order to assess vegetation diversity, a digital land use and vegetation map at scale 1:250,000 from the National Institute of Geography, Statistics and Informatics (INEGI) was used. This map is based on photo-interpretation of aerial photographs dated from 1968 to 1986, plus a considerable amount of fieldwork. The classification scheme was derived from the vegetation classification by Miranda and Hernandez X. (1963). It includes 49 categories of natural vegetation types based upon physiognomic, floristic and phenologic attributes (Table 1). Figure 2 shows this map at subformation level. The digital version of this map was obtained by digitizing the 122 sheets covering the Mexican territory. A more recent version of this map (based on remotely-sensed images) is available. However the older version was used as we consider it more accurate and representing a higher proportion of natural land cover due to the subsequent high rates of deforestation in Mexico (Mas et al.

2004b). This map, which includes more than 52,500 polygons of natural vegetation (minimum mapping unit 250,000 m²), was rasterized at 200 meter cell size. The pixel size was determined according to O'Neill et al. (1996) who recommend that the grain of the data should be 2 to 5 times smaller than the feature of interest in order to avoid biasing the estimation of small patch size.

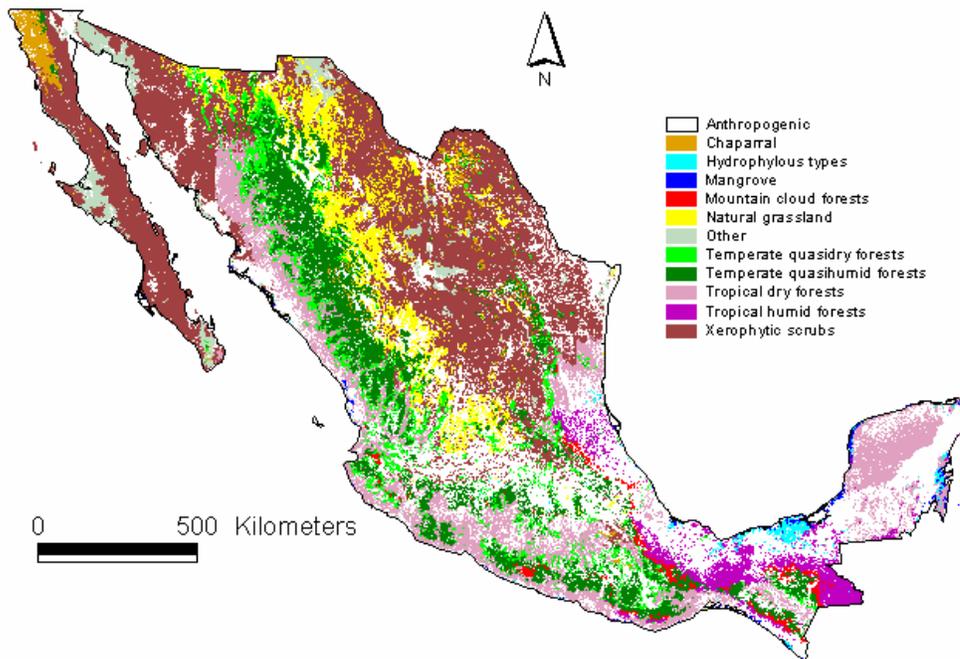


Figure 2 - Land use and vegetation map (source: Series I, National Institute of Geography, Statistics and Informatics INEGI). A reclassification was made merging vegetation types that belong to the same broadened class; This classification was named subformation level and specifically developed for the purpose of this paper. Sources: Series I, INEGI, 1980.

Table 1 - INEGI ,1980. Land use and vegetation cartography classification scheme (only natural land cover categories are indicated).

Formations	Subformations	Vegetation types
Temperate forest	Temperate quasihumid forests	1. Cedar forest , 2. Fir forest, 3. Pine forest, 4. Conifer scrubland, 5. Douglas fir forest, 6. Pine-oak woodland, 7. Pine-oak forest , 8. Oak-pine forest, 11. Gallery forest
	Temperate quasidry forests	9. Oak forest
	Mountain cloud forests	10. Mountain cloud forest
Tropical forest	Tropical humid forests	Perennial & sub-perennial rainforest: 12. Tropical evergreen forest, 13. Tropical sub-evergreen forest, 14. Tropical evergreen forest (medium height), 15. Tropical sub-evergreen forest (medium height), 16. Tropical evergreen forest (low height), 17. Tropical sub-evergreen forest (low height) , 18. Gallery forest
	Tropical dry forests	Deciduous & sub-deciduous forests: 19. Tropical sub-deciduous forest (medium height), 20. Tropical deciduous forest (medium height), 21. Tropical sub-deciduous forest (low height) 22. Tropical deciduous forest (low height), 23. Tropical spiny forest
Scrubland	Xerophytic scrubs	24. Sub-montane scrubland, 25. Spiny Tamaulipecan scrubland, 26. Cacti-dominated scrubland 27. Succulent-dominated scrubland, 28. Succulent-cacti-dominated scrubland, 29. Sub-tropical scrubland, 31. Xerophytic scrubland, 32. Succulent-cactus-dominated cloud scrubland,, 33. Rosetophylous scrubland, 34. Desertic xerophytic rosetophylous scrubland, 35. Desertic xerophytic microphylous scrubland,, 36 <i>Propospis</i> spp.-dominated, 37. <i>Acacia</i> spp.-dominated
	Chaparral	30. Chaparral
Grassland	Natural grassland	39. Natural grassland, 40. Grassland-huizachal, 41. Halophilous grassland, 43. Alpine bunchgrassland, 44. Gypsophilous grassland
Hygrophilous vegetation	Mangrove	45. Mangrove
	Hydrophylous types	46. Popal-Tular
Other vegetation Types	Other	38. Vegetation of sandy desertic conditions, 47. Riparian vegetation , 48. Costal dune vegetation, 49. Halophilous vegetation,
Anthropogenic	Anthropogenic	42. Savannah, 0. Anthropogenic grassland

A digital elevation model (DEM) with a spatial resolution of 200 m was obtained by interpolation of contour lines from topographic maps at scale 1:250,000 by INEGI. The DEM was used to create slope and aspect maps. The software Arc/info was used to manage the GIS database and to calculate diversity and topographical indices.

Elaboration of vegetation diversity types maps

Vegetation diversity types (VDT) maps were created by computing a diversity index from the observed proportions of different vegetation types within a window (support region or kernel), which was translated across the study area in steps of one pixel. Water and man-made covers (urban, agriculture and pasture) pixels were ignored in order to focus on the diversity of natural vegetation types. The windows which presented less than 70% natural cover were not taken into account in subsequent analyses because significant land cover conversion can lead to the elimination, or to a dramatic reduction, of some specific vegetation types and consequently may bias the diversity estimate.

Windows of different sizes ranging from 1 to 10,000 km² were used. The window was centred on each pixel of the original land use and vegetation map, and the diversity index was calculated within the window and stored in a new VDT map at the location of the subject pixel. Therefore, each pixel of the diversity map represents the vegetation diversity within the surrounding blocks of the original data set.

The vegetation diversity was based upon the Simpson's index (Simpson 1949). Vegetation type proportions replaced the species proportions used in the original equation. This vegetation index (1) was calculated from the observed proportions (P_i) of the i different vegetation types in a window as:

$$I = 1 - \sum_{i=1}^n P_i^2 \quad (1)$$

The index ranges from 0 to 1 with a larger index value indicating greater diversity. The Simpson's index is easy to visualize and its properties are well known by many ecologists. It takes into account the number of types of vegetation present, as well as the relative abundance of each vegetation type. The Simpson index represents the probability that two randomly selected polygons in the area belong to the different vegetation types. Compared to most other diversity indices, the Simpson's index is relatively more sensitive to changes in abundant vegetation types and less sensitive to changes in rare types. This characteristic may be misleading as a measure of biodiversity. However, this index is adequate to create a first-order proxy of biodiversity and is less sensitive to classification errors in the maps.

Elaboration of topographical attribute maps

The topographic variables used in this study have been chosen because they correlated with vegetation diversity in North American Cordillera (Coblentz and Riitters, 2004). The DEM was used to produce slope and aspect maps. The circular variable (angle between 0° and 360°) of slope aspect was reclassified into four categories (north, south, east and west aspect). Then these maps were used to elaborate several topographic variables using the same window method used to calculate the VDT. Windows of different sizes were centered on each pixel of the DEM in order to calculate: 1) the mean elevation, 2) the range of elevation (maximum elevation *minus* minimum elevation within the window), 3) the average slope, 4) the roughness (variance of slope) and, 5) the diversity of aspect (Simpson's index based on the proportions of the four aspect categories).

Analysis of correlation between vegetation diversity types and topography

The analysis of the correlation between vegetation diversity and topographical attributes was performed using GIS and summarized on tables that indicate, for each pixel, the value of the neighbouring VDT and topographical variables for different window sizes. Then, the correlations were analyzed statistically using Spearman's correlation coefficient. Spearman's rank correlation tests the direction and strength of the relationship between two variables. This analysis allowed evaluating the strength of the relationship between VDT and topographical variables with the different window sizes, and therefore to estimate the window size that presents the strongest relation and the best possibility to model VDT from topographical variables. A confidence interval for the values of the coefficient was constructed using Fisher's z transformation that converts the correlation coefficients into a normally distributed variable (Hollander and Wolfe, 1999). Finally, the significance for selecting the best window size was evaluated with a Student T-test which allowed to determine if the correlations derived from two windows sizes are significantly different.

VDT modelling

The multi-layer perceptron (MLP) is one of the most popular ANN architecture in use today (Bishop, 1995; Lek and Guégan, 1999) due to its simplicity and because it is based on a supervised procedure, i.e. the network constructs a model based on examples of data with known outputs. The training is done solely from the examples presented, which are assumed to implicitly contain the information necessary to establish the relation.

The architecture of the MLP is a layered neural network, in which the non-linear elements (neurons) are arranged in successive layers, and the

information flows unidirectionally, from the input layer to the output layer, through the hidden layer(s): when the network is executed, the input variable values are placed in the input units, and then the hidden and output layer units are progressively executed. Each calculates its activation value by taking the weighted sum of the outputs of the units in the preceding layer. The activation value is passed through the activation function (typically linear functions in input and output layers, and logistic functions in hidden layers) to calculate the output value of the neuron. When the entire network has been executed, the outputs of the output layer act as the output of the entire network (Figure 3).

The learning procedure is based on a simple concept: if the network gives the wrong answer, then the weights are corrected and the error is lessened so that future responses of the network are more likely to be correct. The best-known example of MLP-training algorithm is back-propagation. In this algorithm, a training pattern is presented to the network and the signals are fed forwards as described above. Then, the network output is compared with the desired output by computing the root mean square (RMS) error. The error is then back-propagated through the network and the weights of the connections are altered according to what is known as the generalized delta rule (Rumelhart et al., 1986; Bishop, 1995):

$$\delta w'_{ij}(t+1) = \eta e_j o_i + \alpha \delta w_{ij}(t)$$

where $w_{ij}(t)$ is the connection weight from input i to neuron j at time t , η the learning rate, e_j the error at processing unit j , and α is the momentum parameter. The learning rate controls the size of weight changes made by the algorithm. The momentum allows the back-propagation algorithm to “pick up speed” if a number of consecutive steps change the weights in the same direction. During the training this process of feeding forward signals and back-propagating the error is repeated iteratively until the error of the network as a

whole is minimized or reaches an acceptable magnitude. A detailed description of ANNs architecture and training can be found in Bishop (1995), Hewitson and Crane (1994) and Levy and Varela (2003).

In this study, an attempt was made to model vegetation diversity types based on the topographical attributes and using a MLP. The input layer comprises processing elements (neurons) that represents each of the explanatory topographical variables, and the output layer contains a single neuron that gives the value of the dependent variable to be predicted, i.e. vegetation diversity. A key design decision is the question of how many hidden neurons to include in the network. In this work, the MLP configuration was determined empirically by testing various possibilities and evaluating their performance.

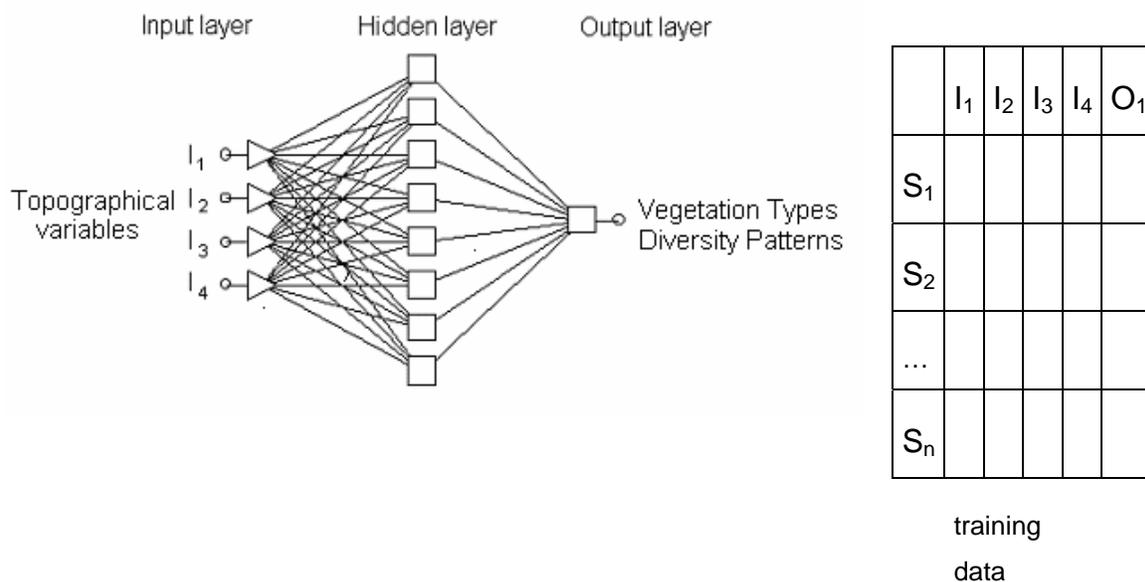


Figure 3 - Schematic illustration of the MLP, with one input layer, one hidden layer and one output layer. In this illustration these layers comprise 4, 8 and one neuron(s) respectively. The right-hand side of the figure shows the data set to be used in order to train this network. I_1 , I_2 , I_3 , and I_4 are the input topographical variables, O_1 is the output variable (vegetation diversity) and, S_1 , S_1 , S_1 , ... are the observation data derived from each observation (pixel) on the topographical attributes and the vegetation diversity maps.

Training was done using the back-propagation algorithm. As the network is trained to minimize the error on the training set, a major issue is over-fitting to the training data. In order to avoid over-fitting, cross-verification was used: some of the training cases (verification set) were not actually used for training but kept as an independent check on the progress of training. As training progresses, the training error progressively drops. If the verification error stops dropping, or starts to rise, this indicates that the network is starting to over-fit the data, and training should stop. A third subset, the test set, was not used at all during training but allowed to track the network's error performance and to identify the more efficient networks.

In order to evaluate the importance of the input variables, a sensitivity analysis was carried out. This analysis rates variables according to the deterioration in performance that occurs if that variable is no longer available to the model. It indicates which input variables are considered most important by a particular network (Saltelli et al. 2004).

A map of predicted VDT was elaborated using the MLP outputs. In order to identify and analyze the errors of the model, this map was compared with the original VDT map.

RESULTS AND DISCUSSION

The effect of analysis window size on the strength of the relationship between topographic attributes and VDT was assessed. The Figure 4 shows the Spearman's correlation coefficients found between VDT and the topographical attributes as a function of window sizes, along with the 95% confidence interval of the estimations. The relationship between VDT and the topographical variables resembled typical species-area curves with an asymptote for a window size of 6,000 km². Wickham et al. (1995) reported a

similar relationship between land cover richness (number of vegetation types in the window) and elevation range. It can be observed that, for small window sizes (area < 400 km²), the relationship between VDT and topographical attributes is less robust (coefficient of correlation ranges from 0.05 to 0.17 for 1 x 1 km² windows) although it remains significant ($p = 0.01$). The mean area of polygons of natural covers (at scale 1:250,000, the one used in this research) is 21 km², which means that, generally, small windows are located entirely inside a polygon and diversity is null. When the window is larger or is located on the boundary between polygons with different land cover categories, the diversity index increases. Therefore, the diversity index calculated within small windows is very sensitive to edge-effect (Figure 5). With larger window sizes, this “edge effect” disappears and correlation increases. With a window size of 80 x 80 km², correlation between elevation range and VDT reaches 0.53 (significant at $p = 0.01$). For windows larger than 80 x 80 km², the correlation presents a small increase or even a small decrease, depending on the topographical variable, because these windows lead to an excessive generalization. A T-test showed that the improvement of the correlation from window size of 80 x 80 km² to 100 x 100 km² is significant only for one variable at $p = 0.01$ (elevation range). There is no significant increase of correlation for three variables (elevation, roughness and slope) and a significant decrease for aspect diversity ($p = 0.05$). Therefore, we considered the window of 80 x 80 km² as the optimal in order to model VDT using topographical variables, because it is a tradeoff between the edge effect related with too small windows and an excessive generalization due too large windows.

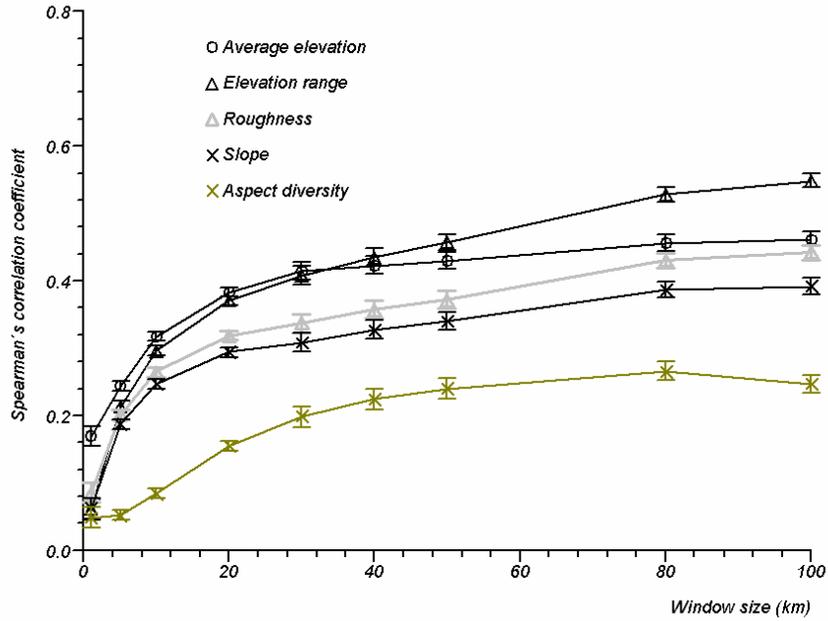


Figure 4 - Determining the optimal window size. The figure shows the correlation between Vegetation Diversity Types and several topographical attributes at different window size analyses. The error bar represents the 95 % confidence interval of the coefficient.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

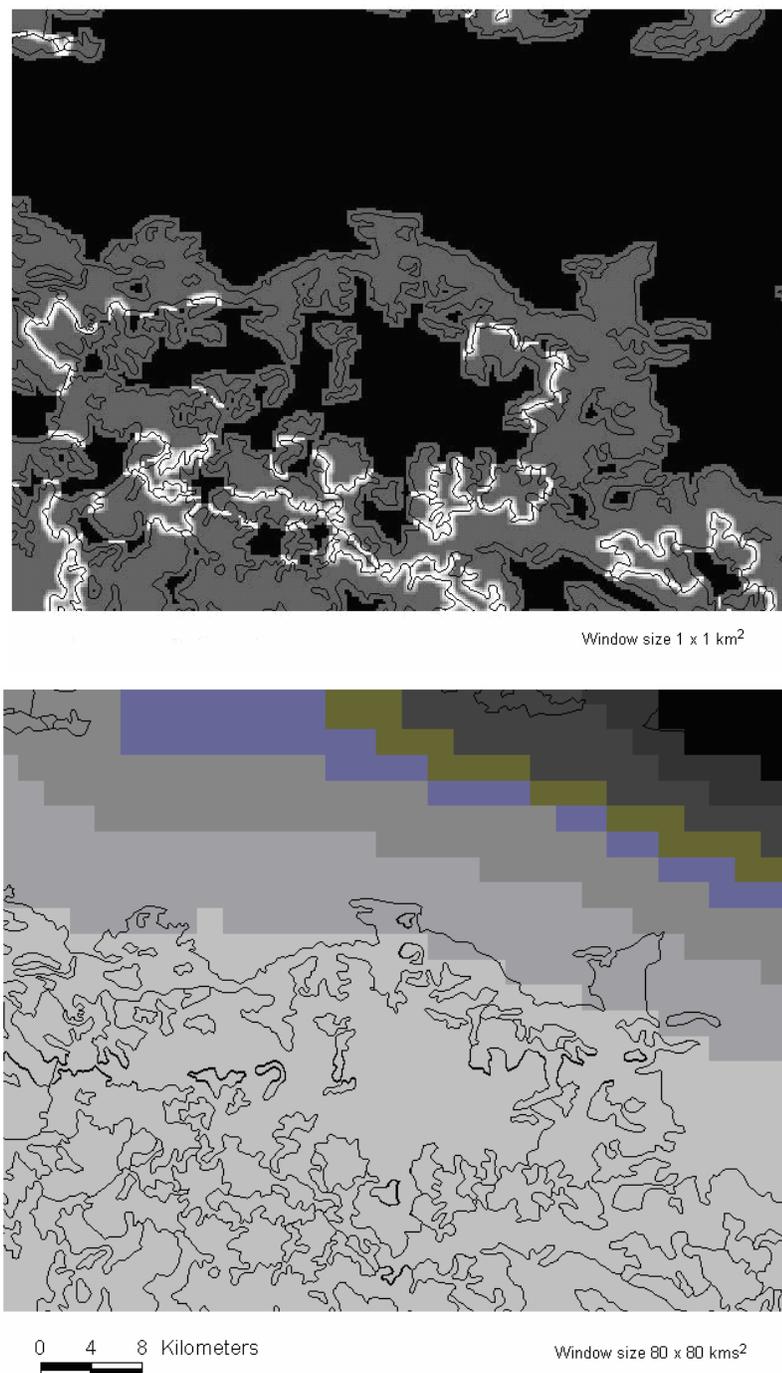


Figure 5 - Vegetation diversity types index derived from different size windows. The figure shows the boundaries of the polygons of the vegetation types map along with a grey-scale representation of the vegetation types diversity. A dark pixel corresponds to a low diversity value. With 1 x 1 km² windows, the variation of the estimate of vegetation types diversity is strongly related to edge proximity. This “edge effect” disappears with 80 x 80 km² window sizes.

O'Neill et al. (1996), by looking at the effect of scale in landscape indices, observed the same bias and recommended using a window 2 to 5 times greater than the largest patch on the landscape. In our case, the results are similar, so that the window of 80 x 80 km² (total area of 6,400 km²) corresponds to 4.5 times the average area of the one percent largest polygons.

Physical attributes depicting a complex topography (such as elevation range, roughness, slope type and diversity of aspect) correlated positively with VDT. Heterogeneous topography creates a patch-work-like pattern suitable for multiple habitats within a relatively small geographical space, which leads to by large vegetation diversity (Hoersch et al. 2002).

The results, based upon the Spearman correlation coefficient between topographical variables and VDT at the appropriate window size (80 x 80 km²), suggest that VDT can be predicted from topographical attributes. The Pearson coefficient of correlation between topographical variables was calculated to assess their statistical independence. Table II shows that the mean elevation and the aspect diversity have an intermediate to high level of correlation (values from 0.3 to 0.5) with the other topographical variables, whereas the range of elevation, the roughness and the slope are very highly correlated (Pearson > 0.8, in bold in the table). Therefore, it is clear that the mean elevation, the aspect diversity and one of the highly correlated attributes incorporate relevant information about topography and that not all the variables are needed to derive a predicted VDT.

The MLP was trained by back-propagation using data divided in three sections: the training set, the verification set, and the test set following the proportion 1/2, 1/4 and 1/4, respectively (8964, 4482 and 4482 cases). The “best” network we found used four topographical variables as inputs, with a hidden layer comprising eight neurons. It was trained in 48 complete

iterations of the training set and presents a RMS error of 0.1666 (based on the test data).

Table 2 - Pearson correlation coefficients for topographical variables calculated for 80 x 80 km² windows.

Topographical variable	Mean elevation	Range of elevation	Roughness	Slope	Aspect diversity
Mean elevation	1	.			
Range of elevation	.524**	1			
Roughness	.454**	.902**	1		
Slope	.382**	.838**	.900**	1	
Aspect diversity	.349**	.376**	.377**	.314**	1

** significant at p= 0.01

As shown by the sensitivity analysis (table III) the more important explanatory variables of the model are the range of elevation, the roughness and the mean elevation. The hierarchy is not exactly the same as the one given by the correlation coefficient due to the correlation between explanatory variables. The model used two out of the three variables best correlated to the types vegetation diversity index (elevation range and roughness), and the two variables less correlated with the other topographical variables (mean elevation and aspect diversity).

Table 3 - Sensitivity Analysis of the Neural Networks Model. The error indicates the performance of the network if that variable is "unavailable". The ratio reports the ratio between the RMS error and the baseline error (i.e. the error of the network if all variables are "available"). The rank simply lists the variables in order of importance (i.e. order of descending error).

Performance index	Range of elevation	Roughness	Mean elevation	Aspect diversity
Rank	1	2	3	4
RMS Error	0.218	0.202	0.179	0.169
Ratio	1.294	1.195	1.059	1.001

The values of VDT predicted by the MLP were used to construct a map of diversity (figure 6).

In order to visualize the spatial distribution of the error in estimating VDT from topographical attributes, the difference between the VDT values derived from the land use and vegetation map and those obtained by the ANN model was calculated for each window. Figure 7 illustrates the spatial distribution of the error and shows that the error is not randomly distributed (over and underestimation of diversity are spatially aggregated), and therefore that there are underlying factors which influence the pattern distribution error.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

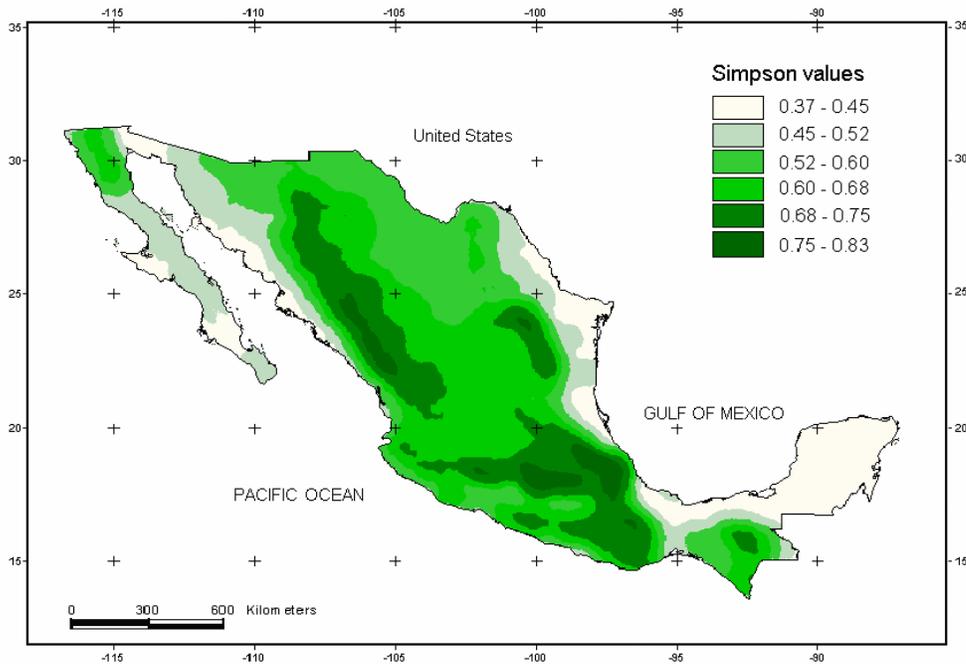


Figure 6 - Map of vegetation diversity type patterns obtained from topographical attributes.

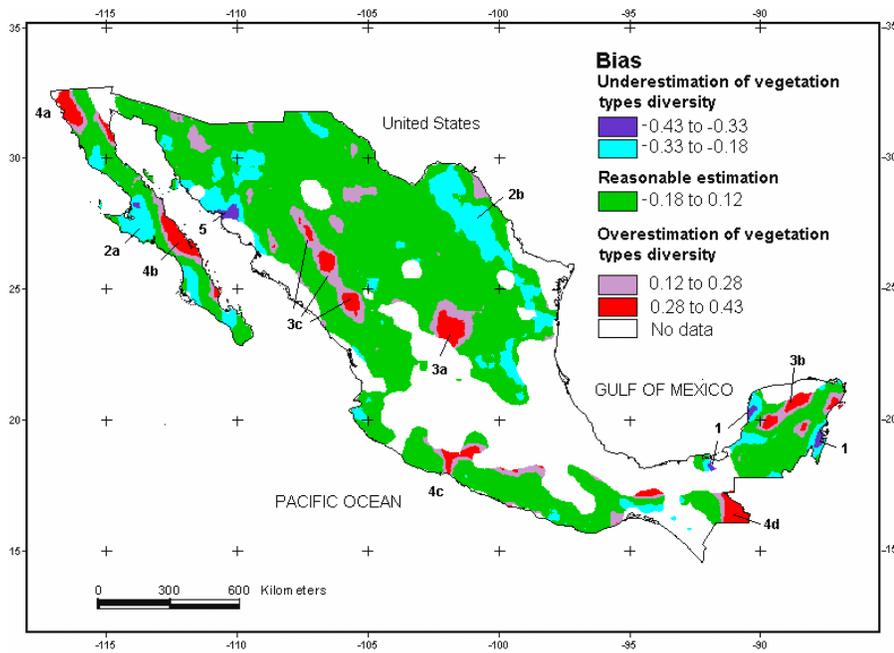


Figure 7 - Model error spatial distribution. The bias is calculated as the “true” vegetation diversity types minus modelled vegetation diversity types. No data corresponds to areas which present less than 70% of natural vegetation and where the true VTDP was not calculated.

In order to pinpoint the limitations of the model, the error map (bias of diversity estimation) was visually compared with maps of variables such as the floristic zoning (Rzedowsky et al. 1990), the biogeographical regions (CONABIO 1997), the natural regions (Cervantes-Zamora et al. 1990) and the climatic zoning (García et al. 1998). The comparison shows that:

Some of the areas where the model underestimates VDT are flat coastal areas where the presence of large areas of swamp and mangroves is associated with the marine influence and does not depend upon the topography (see the areas indicated as number 1 in figure 5). This situation does not occur in the pacific coast where the mountains are close to the litoral

Other areas where diversity was underestimated by the model correspond to natural regions such as the Desert of San Sebastian Vizcaino in the Baja California peninsula (Cervantes-Zamora et al. 1990). This region presents high diversity as it is located between two climatic systems that originate two types of desert (see number 2a of figure 5). Other underestimated areas in the north-eastern part of the territory are located at the limit between the coastal plain of the Gulf of Mexico and the high plateau, which corresponds to a change of climatic zone from temperate to tropical conditions (see number 2b of figure 5).

Many areas where the model overestimates diversity correspond to the core area of biogeographical regions such as the central high plateau (3a), the Yucatán Peninsula (3b) and the highest portion of the Sierra Madre Occidental (3c). As the data used to train the model were derived from windows which, due to their size, often comprise several natural regions, the model accounts with diversity due to the inclusion of different regions. Therefore the model tends to overestimate diversity in regions which belong to one natural region only.

In some cases, overestimated areas correspond to areas dominated by only one type of vegetation: Chaparral (4a), succulent-dominated scrubland (4b), tropical deciduous forest (4c) and, evergreen tropical forest (4d). Some of these areas are natural regions (4d) Sierra Lacandona, (Cervantes-Zamora et al., 1990) or biogeographical regions and floristic regions (4a) (CONABIO, 1997 and Rzedowsky et al., 1990).

In at least one case, a region where the model apparently underestimates diversity, the model actually underestimates vegetation diversity. This is due to error labelling of polygons at the boundary between two sheets, which produces a fictitious increase of vegetation types (5).

As stated before, VDT cannot be totally explained and modelled by topographic attributes. Nevertheless, the model presented above yields a good estimate (over seventy four percent of total national land area) of VDT using only topographical variables. Thus, while it must be acknowledge that many other factors in addition to topography influence current VDT, it is conclude that topography plays a primary role in biodiversity distribution at regional to continental scales. The mayor contribution of this paper to the scope of the paper is a methodological shortcut to estimated beta and gamma biodiversity patterns. A deep analysis on what is the role that other variables, beyond topographic attributes, play to explain the current VDT as obtained in this paper constitutes a major challenge. Clear examples of these variables are paleogeological, biogeographic trends, climatic shifts, cultural footprints. This analysis is out of the scope of the present contribution.

Many studies suggest that land cover and vegetation accurately portray biodiversity distribution patterns (see for example Burnett et al., 1998; Priego-Santander et al., 2004). Therefore, VDT maps can be used as a first approximation of biodiversity distribution. However, some vegetation types, such as evergreen tropical forests cover extensive areas and are very diverse

whereas others vegetation types might form small patches within landscape and be species-poor. Moreover, the classification scheme can be more detailed for certain kinds of vegetation, leading to an increase of the number of vegetation types and, therefore, increasing the types of vegetation diversity artificially. Our approach depends therefore upon the scale and the detail of the classification scheme. As a consequence, vegetation diversity must be extrapolated to biodiversity with caution. However, the map of VDT shows some of the areas known as biodiversity hotspots.

It has been extensively documented that biodiversity sampling has been biased towards accessible areas (see for Mexico, Bojórquez-Tapia et al. 1994), so that surrogate attributes are urgently needed to accurately portray biodiversity patterns (Velázquez et al. 2003). The major advantage of the approach used here is that spatially referenced topographic data are available for large areas at 3-arc-second resolution (e.g., Shuttle Radar Topographic Mission), thus offering a more reliable and uniform predictor database compared with direct climatic, geomorphological or edaphic data. Thus, modelling diversity from topographical variables can be a practical approach that does not depend on the availability of accurate spatial data on climatic, edaphic or geomorphological data. This is particularly important for tropical countries with high biodiversity where accurate geographical databases, at the appropriate scale, are often lacking.

REFERENCES

Aitkenhead MJ, Mustard MJ and McDonald AJS (2004), Using neural networks to predict spatial structure in ecological systems. *Ecological Modelling* 179 (2004) 393–403

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

Bishop CM (1995) *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press, Oxford, England, 482 p.

Bojórquez-Tapia LA, Balvanera P and Cuarón AD (1994) Biological inventories and computer data bases: their role in environmental assessment. *Environmental Management* 18:775-785.

Brechin SR, Wilshusen PR, Fortwangler CF and West PC. (2003) *Contested nature*. State University of New York Press. USA. 321 p.

Burnett MR, August JH, Brown Jr. and Killinberg KT (1998) The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity. I. A patch-scale perspective. *Conservation Biology* 12:363-370.

Ceballos G, Ehrlich P, Soberón J, Zalazar I and Fay JP (2005) Global Mammal conservation: what we must manage. *Science* 39 (22):603-607.

Cervantes-Zamora Y, Cornejo-Olguin SL, Lucero-Marquez RL, Espinoza-Rodriguez JM, Miranda_Viquez E y Pineda-Velazquez A (1990) Clasificación de Regiones Naturales de México, IV. 10. 2. *Atlas Nacional de México*. Vol. II. Escala 1:4,000,000.

Coblentz DD and Riitters KH (2004) Topographic controls on the regional-scale biodiversity of the south-western USA. *Journal of Biogeography* 31:1125-1138.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1997) Provincias biogeográficas de México. Escala 1: 4,000,000, México.

Corne SA, Carver SJ, Kunin WE, Lennon JL, Willem W (2004) Predicting Forest Attributes in Southeast Alaska Using Artificial Neural Network, *Forest Science*; 50, 2: 259-276.

Cihlar J and Jansen L (2001) From Land Cover to Land Use: A Methodology for Efficient Land Use Mapping over Large Areas. *Professional Geographer* 53 (2): 275-289.

Foody G M and Cutler M E (2006) Mapping the species richness and composition of tropical forests from remotely sensed data with neural networks. *Ecological Modelling*, 195, pp. 37-42.

García E (1988) *Climas (Clasificación de Köpen, modificada por García). Escala 1:1,000,000*. Serie Libros Num.6. Instituto de Geografía. UNAM. México.

Groombridge B and Jenkins MD (2000) *Global biodiversity. Earth's living resources in the 21st century*. World Conservation Press, Cambridge, UK.

Harner RF and Harper KT (1976) The role of area, heterogeneity and favorability in plant species diversity of pinyon-juniper ecosystem. *Ecology* 57: 1254-1263.

Hewitson BC and Crane RG (1994), *Neural Nets: Applications in Geography*:. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 192 pp.

Hilbert DW and Ostendorf B (2001) The utility of artificial neural Networks for modelling the distribution of vegetation in past, present and future climates. *Ecological Modelling*, Volume 146, Number 1, 1 December 2001 ,pp.311-327(17)

Hoersh B, Braun G and Schmidt U (2002) Relation between landform and vegetation in alpine regions of Wallis, Switzerland. A multiscale remote sensing and GIS approach. *Computers, Environment and Urban Systems*. 26: 113-139.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

Hollander M and Wolfe DA (1999) *Non-parametric Statistical Methods* (2nd edition). New York: Wiley .

INEGI (1980) Sistema de Clasificación de Tipos de Agricultura y Tipos de Vegetación de México para la Carta de Uso del Suelo y Vegetación de INEGI, escala 1: 250,000. *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. Aguascalientes, Ags. México.

Jensen JR, Qiu F and Ji M (1999) Predictive modelling of coniferous forest age using statistical and artificial neural network approaches applied to remote sensor data. *Ecological Modelling* 20 (14), 2805–2822.

Kim G and Barros AP (2001) Quantitative flood forecasting using multisensor data and neural networks. *Journal of Hydrology* 246 (1-4), 45–62.

Lassueur T, Joost S and Randin CF (2006) Very High resolution digital elevation models: Do they improve models of plant species distribution?. *ELSEVIER. Science Direct. Ecological Modelling* 198. 139-153.

Lek S, Delacoste M, Baran P, Dimopoulos I, Lauga J, Aulancier S (1996) *Application of neural networks to modelling non-linear relationships in ecology. Ecological Modelling* 90, 39e52.

Lek S and Guégan JF (1999) Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction, *Ecological Modelling*,120:65-73.

Levi JP and Varela J (2003) *Análisis Multivariable para las Ciencias Sociales*. Prentice Hall. Spain. 862 pp.

Lozano-García S, Sosa-Najera S, Sugiura Y and Caballero M. (2005) 23,000 yr of vegetation history of the Upper Lerma, a tropical high-altitude basin in Central Mexico. *Quaternary Research*, 64(1): 70-82.

Lugo HJ (1990) El relieve de la República Mexicana. UNAM, *Instituto de Geología*, Revista, 9: 82-111.

Manel S, Dias JM and Ormerod SJ (1999) Comparing discriminant analysis, neural networks and logistic regression for predicting species distributions: a case study with Himalayan river bird. *Ecological Modelling* 120, 337–347.

Mas JF (2004) Mapping land use/cover in a tropical coastal area using satellite sensor data, GIS and artificial neural networks, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59(2):219-230.

Mas JF, Puig H, Palacio JL y Sosa AA. (2004a) Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks, *Environmental Modelling and Software*, Vol. 19(5):461-471.

Mas JF, Velázquez A, Díaz-Gallegos JR, Mayorga-Saucedo R, Alcántara C, Bocco G, Castro R, Fernández T and Pérez-Vega A. (2004b) Assessing land use/cover changes : a nationwide multirate spatial database for Mexico, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4):249-261.

Mayr RM (2000) Living together. *Science* 288(5464).

Miranda and Hernandez X (1963) Los tipos de vegetación de México y su clasificación. Boletín de la sociedad Botánica de México. *Colegio de Postgraduados*. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidraulicos.

Muller C, Berger G and Glemnitz M (2004) Quantifying geomorphological heterogeneity to assess species diversity of set-aside arable land . *Agriculture Ecosystems & Environment* (104) 587-594.

Nichols WF, Killinbeck KT and August PV (1998) The influence of geomorphology heterogeneity on biodiversity. A landscape perspective. *Conservation Biology* 2:371-379.

O'Neill RV, Hunsaker CT, Timmins SP, Jackson BL, Jones KB, Riitters KH and Wickham JD (1996) Scale problems in reporting landscape pattern at the regional scale. *Landscape Ecology* 11: 169- 180.

Paruelo JM and Tomasel F (1997) Prediction of functional characteristics of ecosystems: a comparison of artificial neural networks and regression models. *Ecological Modelling* 98, 173–186.

Peterson TA, Ortega-Huerta MA, Bartley J, Sánchez-Cordero V, Soberón M, Buddemeier RH and Stockwell DRB. (2002) Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416:626-629

Priego-Santander AG (2004) *Relación entre la heterogeneidad geoecológica y la biodiversidad en ecosistemas costeros tropicales*. PhD thesis, Instituto de Ecología, A. C., Xalapa, Mexico. 117 p.

Rumelhart DE, Hinton GE and Williams RJ (1986) *Learning internal representations by error propagation*. In *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructures of Cognition*, edited by. Rumelhart DE and McClelland JL (Cambridge, MA: MIT Press), pp. 318-362.

Rzedowski J and Reyna-Trujillo T (1990) Divisiones florísticas en Tópicos fitogeográficos (provincias, matorral xerófilo y cactáceas). IV.8.3 *Atlas Nacional de México*. Vol.II. Escala 1:8,000,000. Instituto de Geografía, UNAM. México.

Saltelli A Tarantola S, Campolongo F and Ratto M. (2004) *Sensitivity Analysis in Practice. A Guide to Assessing Scientific Models*, John Wiley & Sons publishers.

Simpson EH (1949) Measurement of diversity. *Nature* 163:688.

Terborgh J, Van Schaik C, Davenport L and Rao M. (2002) *Making parks work*. Island Press. USA. 511.

Tourenq, C, Aulagnier S, Mesle´ard F, Durieux L, Johnson A, Gonzalez G, Lek S. (1999) Use of artificial neural networks for predicting rice crop damage by greater flamingos in the Camargues, France. *Ecological Modelling* 120, 349–358.

Vázquez-Selem L and Heine K (2004) Late Quaternary glaciation of Mexico. In: J. Ehlers and P.L. Gibbard (Editors), *Quaternary Glaciations - Extent and Chronology, Part III: South America, Asia, Africa, Australia, Antarctica*. Elsevier, Amsterdam, pp. 233-242.

Velázquez A, Bocco G, Romero F and Pérez-Vega A (2003) A landscape perspective on biodiversity conservation: the case of Central Mexico. *Mountain Research and Development*, 23(3) 240-246.

Wickham JD, Wade TG, Jones KB, O Nelly RV and Riitters KH. (1995) Diversity of ecological communities of the United States, *Vegetation*, 119:91-100.

Wilshusen PR, Brechin SR, Fortwangler CF and West PC. (2002) Reinventing the square wheel: Critique of a resurgen “protection paradigm” in international biodiversity conservation. *Society and Natural Resources* 15:17-40.

MARCO GEOGRÁFICO E HISTÓRICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

El Bosque Tropical Seco Caducifolio (BTSC) de la zona de estudio se establece en la microcuenca de San José de Chila ubicada en la porción noroeste de la Sierra Madre del Sur, en la región llamada Tierra Caliente del estado de Michoacán. Dicha microcuenca cuenta con una superficie de 570 km², que desembocan en la subcuenca del río Tepalcatepec, que a su vez forman parte de la gran cuenca del Río Balsas. La microcuenca presenta un gradiente altitudinal que va desde 200 hasta 2,200 m.s.n.m. y fisiográficamente pertenece a las laderas de sotavento de la provincia montañosa de la Sierra Madre del Sur.

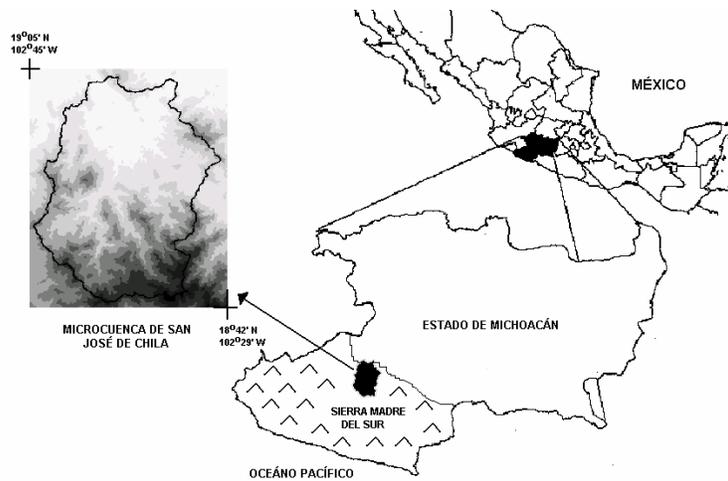


Figura 1 - Localización del área de estudio.

GEOLOGÍA

A la Sierra Madre del Sur se le ha denominado como provincia geológica del complejo orogénico de Guerrero-Colima (Ortega et al., 1992), son las rocas más antiguas del estado de Michoacán. La Sierra Madre del Sur se extiende por unos 1, 000 km, desde el sur de Jalisco y oriente de Oaxaca, cubre una superficie de 13,000 km² aproximadamente. Atraviesa el estado de Michoacán a lo largo y cercanamente a la Costa del Océano Pacífico. En esta sierra casi no hay valles intermontanos, las fracturas y fallas que presenta ponen de manifiesto el activo tectonismo de la región. Su anchura es de casi 100 km y su altitud promedio de 2000 m.s.n.m.

El origen geológico de esta sierra es muy complejo, ya que presenta rocas de diversos orígenes y tipos, se presentan secuencias Vulcano-sedimentarias del Triásico al Cretácico y cuerpos magmáticos del Terciario, los que en suma han generado una sierra con fuertes controles estructurales con dirección dominante de NO- SE, eventuales NE-SO. Las rocas más altas están representadas por las rocas del Triásico y Cretácico que están afectadas por los cuerpos graníticos del terciario (Garduño, 2005). Estos cuerpos graníticos constituyen cuerpos intrusivos llamados batolitos que contiene contactos bruscos y un gran espesor en sentido vertical, con superficies con más de 100 km², de composición principalmente granitoide y asociados a estructuras de rocas sedimentarias y metamórficas de regiones deformadas. Un batolito con frecuencia constituye el núcleo de los anticlinorios, se origina en las primeras etapas de deformación y metamorfismo y aflora como resultado de erosión posterior (Lugo, 1989).

Los procesos geológicos antes mencionados quedan expresados en la zona de estudio por la siguiente secuencia de rocas: rocas sedimentarias del Albiano-Cenomaniano o Turoniano (rocas calizas, arenisca-conglomerado y lutitas-areniscas); del Eoceno-Mioceno (rocas volcánicas intrusivas

constituido por el batolito granítico así como rocas metamórficas de esquistos); y finalmente del Eoceno-Oligoceno (rocas volcánicas extrusivas representadas por andesitas y tobas ácidas, tobas ácidas-brechas volcánicas) (Garduño et al., 1999).

Un estudio de regionalización geomorfológica (Bocco y Mendoza, 1999) ubica a la zona de estudio con tres geoformas principales: lomeríos bajos, lomeríos altos y Sierra.

CLIMA

La Sierra Madre del Sur constituye una barrera orográfica que impide el paso de masas de aire húmedo provenientes del Océano Pacífico, hacia las laderas interiores (laderas de sotavento) pero en contraste los declives exteriores de esta sierra (laderas de barlovento), concentran la mayor parte del contenido de humedad (Maderey, 2007); por esta razón las laderas de sotavento como es el caso de la ubicación de la microcuenca en la zona de estudio, presentan mayor sequedad y es precisamente esta condición orográfica la que condiciona de forma fundamental la dinámica climática.

Por otro lado en la Sierra Madre del Sur del estado de Michoacán son escasas las estaciones climatológicas, en comparación con la red de numerosas estaciones climatológicas en el sistema volcánico transmexicano y en la región de los lagos al norte del estado, por ello la información climática fue obtenida de estaciones meteorológicas cercanas, ya que en el área de interés son inexistentes.

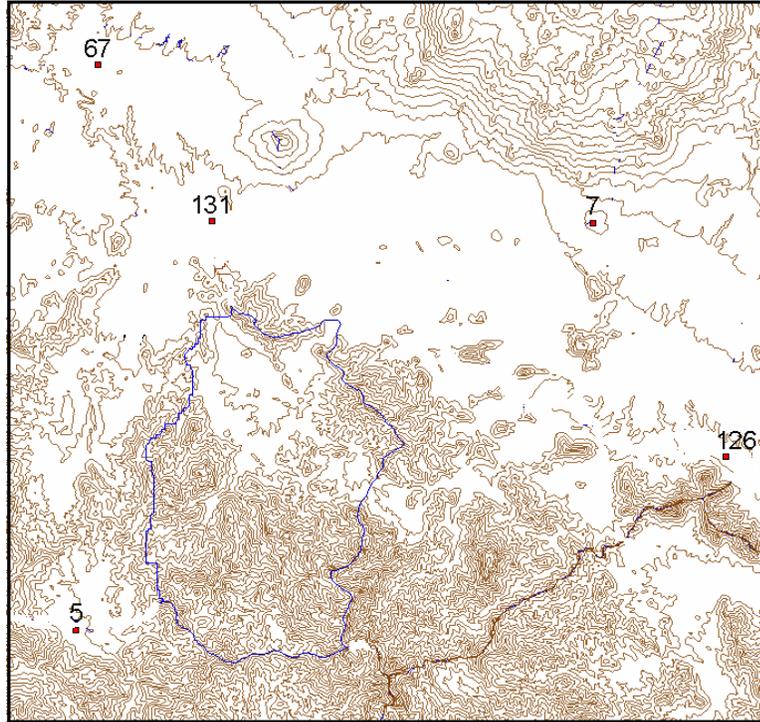


Figura 2 - Localización de las 5 estaciones climatológicas en orden ascendente altitudinalmente: Los Panches, 180 m.s.n.m (**126**); Piedras Blancas, 334 m.s.n.m (**67**); Punta de Agua 430 m.s.n.m (**131**); Apatzingán, 682 m.s.n.m (**7**); Aguililla, 970 m.s.n.m (**5**). Línea azul corresponde a la microcuenca de San José de Chila.

La selección de las estaciones fue tomando en cuenta un gradiente altitudinal similar, así como también una misma orientación de desembocadura (microcuencas con laderas sotavento). Fueron cinco estaciones; dos se ubican en las porciones más bajas altitudinalmente con 180 m.s.n.m. (Los Panches, 126) y 334 m.s.n.m.m (Piedras Blancas, 67); presentan temperaturas medias anuales (TMA) de 27.9° y 28.1° y una precipitación media anual (PMA) de 698.5 mm y 627.8 mm, lo que las clasifica con un clima BS₁(h')w(w)(i)g y BSo(h')w(w)(i)g respectivamente (García, 1964). Otras dos estaciones se ubican en la porción media baja y media de la microcuenca con altitudes de 430 m.s.n.m.m (Punta de Agua, 131) y 682 m.s.n.m.m (Apatzingán, 7), con TMA de 27.7° y 28.7° y PMA de 674.4 mm y

756 mm; con climas BS₁(h')w(w)(i)gw'' y BS₁(h')w(w)(e)g (García, 1964). Todos los climas de las anteriores estaciones corresponden a climas semiaridos (excepto BS₀ es árido, el más seco de los secos), con temperaturas anuales sobre 22° y el mes más frío sobre los 18°; con precipitación 10 veces mayor la cantidad de lluvia del mes más húmedo de la mitad caliente del año que en el más seco; y en los casos de las letras (i') con poca oscilación; (e) extremoso; g marcha de la temperatura tipo Ganges (el mes más calido se presenta antes del solsticio de verano) y w'' presencia de canícula. La última estación es la que se ubica a mayor altitud 970 m.s.n.m (Aguililla, 5); con un TMA de 23.5°, en ella es claro el descenso que sufre la temperatura y la PMA alcanza los 1061.6 mm, condición que la ubica con un clima Aw₁(w)ig; correspondiendo a un clima cálido el más húmedo de los subhúmedos, isotermal (i) (oscilación menor 5°) y marcha de la temperatura tipo Ganges (García, 2004). Todas las estaciones presentan una estación seca bien definida que abarca los meses de noviembre a mayo. Las lluvias están restringidas a la estación de verano casi por completo y en la zona de las tierras bajas cercanas a la depresión del Balsas las lluvias empiezan más tarde que en cualquier parte del estado de Michoacán, ya que comienzan hasta julio continuando hasta septiembre (Stanislowski, 2007).

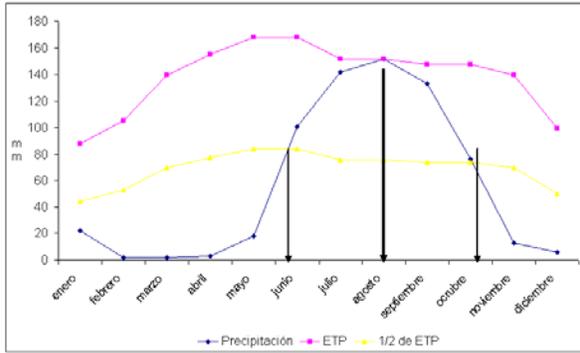
Durante los meses de lluvia, la precipitación puede superar los 750 mm. Las lluvias son torrenciales e impredecibles, los fuertes aguaceros duran usualmente menos de una hora y a menudo caen en la tarde, noche o en las primeras horas de la madrugada. Sin embargo, aún en la época de lluvias, pueden pasar varias semanas sin llover (Pérez, 2001). Las temperaturas más altas tienen lugar en el mes de mayo (42°C en promedio); las temperaturas más bajas se registran en los meses de invierno (promedio mensual de 24°C). En los meses más secos (marzo a mayo) la humedad relativa en el área varía de 50 a 60% en las mañanas y entre 25 a 30% al

mediodía. Durante la temporada de lluvias la humedad relativa es de 70% a 80% en las mañanas, y de 40 a 50% al mediodía. La evaporación media anual sobrepasa los 2,000 mm (Correa Pérez, 1974).

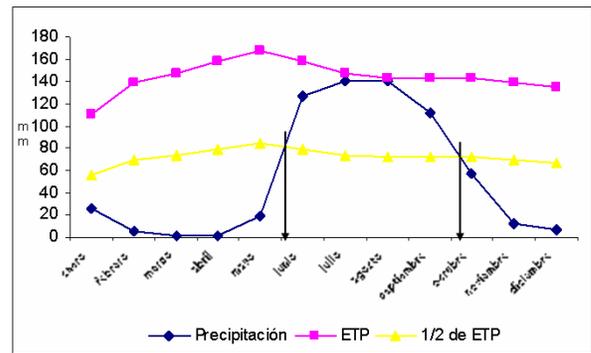
La evapotranspiración juega un papel importante en las laderas de sotavento, por ello la importancia de los climogramas abajo mostrados, donde se puede apreciar de forma muy clara como para las tres estaciones ubicadas altitudinalmente a menos de 500 m.s.n.m, la evapotranspiración potencial rebasa a la cantidad de humedad disponible; mientras que la estación ubicada cercana a los 700 m.s.n.m. (Apatzingán), la evapotranspiración potencial es menor a la precipitación permitiendo un ligero excedente de cantidad de humedad. Sin embargo de forma general las estaciones muestran condiciones de gran sequedad en la que deben subsistir las plantas (Figura 3).

De forma contraria en la estación de Aguililla ubicada en límite superior del BTSC (970 m.s.n.m), la cantidad de humedad excedente es considerable en comparación con la pérdida que realiza la evapotranspiración potencial, creando condiciones de disponibilidad de humedad para las plantas (Figura 3).

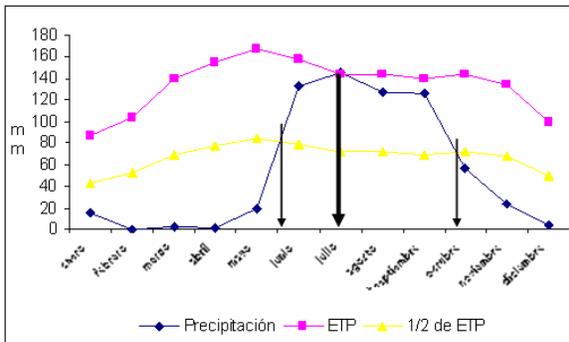
Las fechas más distantes en las gráficas de la figura 3 marcan el inicio y fin del periodo húmedo, el cual es determinado por el cruce entre la media de la evapotranspiración potencial y la curva de la precipitación, logrando con ello, determinar la longitud del periodo de crecimiento, es decir el tiempo continuo en que las plantas disponen de la presencia de humedad (Delgado et al., 2008).



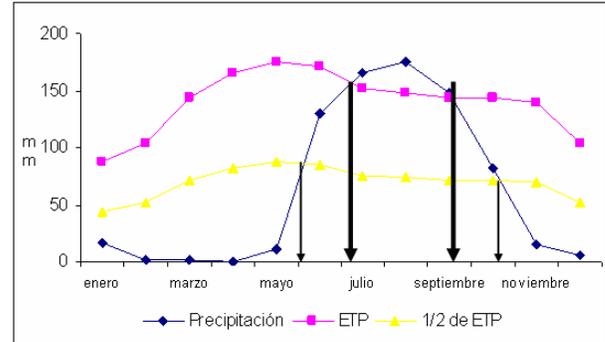
Los Panches 180 m.s.n.m. (porción baja de la microcuenca)



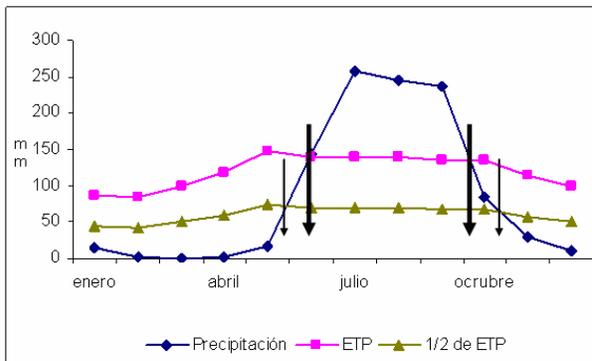
Piedras Blancas 334 m.s.n.m (porción baja de microcuenca)



Punta de Agua 430 m.s.n.m (porción media de microcuenca)



Apatzingán 682 m.s.n.m. (porción media de microcuenca)



Aguililla 970 m.s.n.m.m (porción alta de microcuenca)

ETP = Evapotranspiración potencial

$\frac{1}{2}$ de ETP= La media de la evapotranspiración potencial

Figura 3 - Gráficas de climogramas donde se resalta el inicio y final de la longitud del periodo de crecimiento y su relación con los procesos de evapotranspiración.

HIDROLOGIA

Como se mencionó anteriormente la zona de estudio pertenece a la cuenca del Balsas, la cual representa una de las corrientes más importantes de la República Mexicana y la principal en la margen del Océano Pacífico del país, reúne una superficie de captación de 111,122 Km², de los cuales el 29% corresponde a Michoacán. Dicho porcentaje abarca el 62% del territorio estatal. Este río es el más importante del estado. La porción comprendida en el estado Michoacán se le denomina el Bajo Balsas, que está integrado por cinco subcuencas: Tepalcatepec, Cerrada Paracho-Nahuatzen, Cupatitzio, Tacámbaro y Bajo Balsas, siendo la subcuenca de Tepalcatepec la que corresponde al área de estudio, en donde se originan los escurrimientos del Río Chila. Este presenta sólo un curso principal originado en las superficies cumbres de la microcuenca y numerosos brazos originados en las porciones medias.

La capacidad de acumulación de agua en la zona de estudio es baja, debido a la constitución de las rocas metamórficas e intrusivas, las cuales presentan una permeabilidad baja. Solo hay un acuífero de importancia pero no en la zona de estudio, sino en las zonas aledañas. Este es el acuífero de Apatzingán, el cual es aprovechado en el distrito de riego del mismo nombre. Por otro lado también se presenta ausencia de aguas subterráneas, consecuencia de la baja precipitación y de que las rocas del subsuelo no reúnen condiciones óptimas de permeabilidad para su acumulación (INEGI, 2007).

Por lo que se puede ver, la disponibilidad de agua en la zona de estudio es escasa. Sólo se presenta durante la temporada de lluvias. Esta situación es la principal limitante que explica que esta región sea una de las menos pobladas, pues el establecimiento de actividades agrícolas y pecuarias se enfrentan con la falta de agua, presentado por ello un desarrollo precario.

Además debe agregarse las condiciones de un relieve escarpado y altas temperaturas, elementos adicionales entre otros factores limitantes.

EDAFOLOGÍA

La información edafológica en el país tiene grandes huecos y deficiencias, de forma especial la región de estudio es una de las menos estudiadas, sólo cuenta con cartografía edafológica 1:250,000 (INEGI, 1990). No obstante, hemos recopilado la mayor información posible de los suelos que conforman el BTSC de diferentes fuentes disponibles, tanto en forma regional y de forma específica en la microcuenca del río Chila.

Se menciona que existen dos tipos de suelos predominantes en los BTSC en México; el regosol en el cual se establecen el 30% de los BTSC y el litosol que sostienen al 23% (SPP, 1981). Ambos suelos se presentan sobre laderas de cerros con pendientes de moderadas a altas, son suelos someros, sin capas diferenciadas, con frecuentes afloramientos de las rocas que lo subyacen (INEGI, 1990).

Para INEGI (1999) los suelos predominantes en el BTSC son cambisoles, suelos jóvenes poco desarrollados, y regosoles, los cuales no presentan capas distintivas y se parecen bastante a la roca que los subyace.

Los suelos en la microcuenca de Chila efectivamente tienen características derivadas de la roca madre, no son suelos muy desarrollados, con poco contenido de materia orgánica; tienen una profundidad variable desde 2 cms hasta más de 50 cms, con texturas desde muy arenosas mayor de 80 % (granitos) hasta muy arcillosos con porcentajes de arcilla mayores de 80% (esquistos), lo cual depende del factor litológico; dichos suelos se encuentran situados en laderas con pendientes de moderadas a altas.

CUBIERTA VEGETAL

La manifestación más característica del BTSC es la estacionalidad de su follaje el cual se presenta tan solo en temporada de lluvias y el resto del año se pierde quedando tan sólo ramas y troncos en el caso de arbustos y árboles, mientras la presencia de herbáceas es totalmente estacional (lluvias). El BTSC contiene cerca de 6,000 especies de plantas vasculares, de las cuales 60% son endémicas de México (Rzedowski, 1991b). La riqueza florística de los BTSC en México decrece de sureste al noroeste (Trejo, 1998), ocupando la porción más extensa en la margen Pacífica de la Sierra Madre del Sur que penetra tierra dentro por toda la cuenca del Balsas.

Son precisamente los BTSC de esta región, los que son reconocidos como un refugio de un gran número de especies endémicas, donde se estima que 7 de cada 10 son oriundas de México (Miranda, 1947; Rzedowski, 1978, 1991). Es también el centro más importante de variedad de copales o papelillos, que se cosechan con fines comerciales y para uso ritual (CCA, 1990).

En el caso específico de la microcuenca de Río Chila, el BTSC constituye el tipo de cubierta vegetal más importante en cuanto a superficie en comparación con los bosques de pino y encino; se manifiesta en un gradiente altitudinal de 200 m.s.n.m hasta 1,200 m.s.n.m. El BTSC se establece principalmente en laderas con pendientes de moderadas a fuertes; los árboles presentan una altura del dosel mínima de 10 m en altitudes bajas y alcanza una altura máxima de 20 m en altitudes > 900 m.s.n.m. En el BTSC de la zona de estudio se establecen especies como: *Lysiloma divaricata* (Jacq.) J.F. Macbr., *Cordia elaeagnoides* A. DC., *Caesalpinia platyloba* S. Watson, *Bursera coyucensis* Bullock, *Caesalpinia eriostachys* Benth., *Erythroxylon rotundifolia* Lunan, *Tabebuia chrysantha* (Jacq.) G. Nicholson, *Lonchocarpus caudatus* Pittier, *Randia laevigata* Standl. y *Cochlospermum*

vitifolium (Wild.) Spreng, por citar algunas de las especies más representativas.

En las porciones más altas de la zona de estudio, la cubierta está representada por bosque de pino y bosque de pino-encino, iniciando aproximadamente a los 1,000 m.s.n.m.m. Los pinos están representados por una sola especie (*Pinus sp.* Pino somonque). A menor altitud se ubica el bosque de encino establecido predominantemente en las simas de las colinas de la porción media de la microcuenca, comenzando aproximadamente a los 700 m.s.n.m.m., donde se establecen *Quercus glaucoide* Martens et Galeotti, *Q. magnolifolia* Née, *Q. obtusa* Willd., *Q. resinosa* Liebm., *Q. sororia* Liebm.. El porcentaje de representación de las diferentes familias en la microcuenca de Chila es: Leguminosas 27%; Asteraceae 6.5%; Burseraceae 5% y Euphorbiaceae 4.3% y otras con menor representación (Salazar, 2008).

MARCO HISTÓRICO Y USO DEL SUELO EN LA ZONA

Para hacer referencia histórica de la transformación del paisaje en la zona de estudio, se recurrió a información principalmente regional y a la poca información local, ya que no se cuenta con gran información de los poblados inmersos en la microcuenca de San José de Chila, ya que éstos hasta hoy día, constituyen localidades de unos cuantos caseríos, por ello las fuentes de información histórica son predominantemente para la región de Tierra Caliente. Hay que considerar que los paisajes siempre están cambiando, por ello la geografía debe ser dirigida a los patrones y formas de cambio y a los procesos que producen dichas transformaciones (Baker, 2003).

Para iniciar con la descripción de la transformación del paisaje que ha sufrido la región de Tierra Caliente iniciaremos con el periodo precolonial con un

análisis de González de la Vara (1992), en el cual se menciona que la región de Tierra caliente constituía el límite occidental del imperio purépecha, por lo que fueron fundamentales las actividades de estrategia militar, desde donde se pudiera advertir a gran distancia la presencia del enemigo y frenar su avance; al mismo tiempo se realizaban actividades productivas y sociales, que sostenían las actividades militares, tales como asentamientos humanos habitacionales, cultivo en terrazas, reserva de agua de lluvia. Pero además de las funciones fronterizas, estos pueblos pudieron ser puntos de producción y nodos en la red de intercambio de productos de los diferentes pisos ecológicos de la región; en los paisajes de bosque tropical seco eran practicadas actividades agrícolas a través de técnicas de roza, tumba y quema (Barragán, 2001). Exploraciones arqueológicas en la zona de estudio (Chila), pudieron elucidar que había una población más numerosa que la que existente en el momento que se realizó la conquista; se piensa que el poderío purepecha sometía y destruía pueblos nahuatlano de estas regiones (Aguirre, 1995).

Durante la época colonial y principalmente en la segunda mitad del siglo XVIII, buena parte de las comunidades fueron despojadas de sus tierras quedando en manos de la propiedad privada (Sánchez-Díaz, 1987). Los indígenas fueron congregados cerca de los monasterios, haciendas y rancherías de los terratenientes españoles y forzados a realizar trabajos pesados (Barragán, 2001). Buena parte de la población indígena fue consumida por la peste (Botello et al., 1987). Con la llegada de los españoles también llegó la introducción del ganado, que en la región estuvo representado principalmente por el ganado vacuno alternado con actividades agrícolas utilizando las técnicas indígenas de roza-tumba y quema. Posterior a la guerra de independencia la estructura social y el auge regional resultaron dañados severamente (Barragán, 2001). Pero las condiciones socioeconómicas de la mayoría de la población no cambiaron esencialmente;

fueron rancheros ya establecidos y nuevos rancheros quienes se pelearon a muerte por la posesión de la tierra, en donde llevaron a cabo actividades agrícolas y ganaderas en las haciendas (Barragán, 2001). En las pocas propiedades comunales siguieron los despojos a través de largos alegatos de propiedad de la tierra, donde finalmente la “justicia” generalmente dio su fallo a favor de la propiedad privada. Otras tierras comunales fueron arrendadas por míseros pagos o invadidas por los hacendados (Sánchez-Díaz, 1987, 1992). Los dueños de las haciendas o arrendatarios solicitaban préstamos a las instituciones bancarias, siendo éstas últimas las principales instituciones crediticias de la época y las que finalmente adquirieron la posesión de importantes superficies de tierra por la falta de pagos a sus créditos. Fue también durante este periodo donde se llevó a cabo la más importante transformación y modernización de la maquinaria agrícola (Sánchez-Díaz, 1988, 1992). Las haciendas fueron sostenidas de manera primordial por las actividades de ganadería bovina, bajo un creciente acaparamiento de tierras y beneficios legales y con formas extensivas de producción (Mendoza et al., 2007). Además se promulgaron leyes (1887) que favorecieron la transformación de la propiedad comunal a propiedad privada, estableciendo innumerables haciendas, las cuales fueron la unidad productiva en torno a la cual giró el desarrollo agropecuario de Tierra Caliente durante el periodo colonial y el siglo XIX. En ese período en la zona de estudio se estableció la extensa hacienda de Chila conformada con 73 mil hectáreas que en 1790 fue propiedad de Francisco Álvarez y durante muchos años fue conservada por sus descendientes hasta 1834, la cual fue vendida a Antonio Sierra (Sánchez-Díaz, 1987). Las tierras ocupadas por la hacienda fueron las partes bajas donde se disponía del curso fluvial del Río Chila; en donde se realizaban actividades agrícolas sobre la planicie fluvial con tierra fértil y con disponibilidad de agua durante las lluvias y pocos meses después de estas; también se realizaron actividades ganaderas en la zona de lomeríos bajos con laderas suavizadas. En contraste, las áreas montañosas de las laderas

escarpadas donde se establece el BTSC no fueron utilizadas de manera significativa durante ese período. Sin embargo en las partes más altas de la zona templada de la microcuenca, se establecieron pequeños ranchos que proveían de madera de encinos y pinos para las actividades de la hacienda (comunicación personal, Pablo Valladares).

Para principios del siglo XX, se presentaron los resultados del censo ganadero de 1902 para toda la República, donde es interesante ver como Veracruz de haber ocupado el primer sitio como productor pecuario, pasó al cuarto lugar; ocupando los primeros tres sitios Jalisco, Michoacán y Chihuahua convertidos en los principales productores de bovinos (Mendoza et al., 2007).

El despojo agrario, la entrada de nuevas tecnologías, la concentración de la tierra en unas cuantas manos, la intensificación en la explotación de los recursos naturales, el despliegue de las agriculturas comerciales y la actividad pecuaria, resultaron los factores que alteraron el paisaje generando así un nuevo cambio geográfico (Mendoza et al., 2007) y social, ya que la desigualdad económica enarboló una nueva lucha de la clase oprimida dando como resultado el movimiento revolucionario de 1910 y al término de las luchas armadas en la tercera década, las demandas campesinas por la tierra y acceso a la producción fueron escuchadas con el decreto de la reforma agraria, donde muchos hacendados tuvieron que ceder importantes superficies a los campesinos cuando el gobierno de Lázaro Cárdenas promulgó la propiedad ejidal.

Durante el período expropiatorio en la hacienda de Chila, los dueños de la hacienda no esperaron que el gobierno hiciera la repartición de tierra, ellos dividieron las parcelas a los futuros ejidatarios, con la intención de conservar las mejores tierras, dejando a los ejidatarios las tierras abruptas de las laderas montañosas donde se establece predominantemente el BTSC.

Durante varias décadas después de la expropiación, los ejidatarios no ocuparon las áreas de BTSC en laderas abruptas, debido a lo delgado de los suelos y a la carencia de agua donde era imposible hacer prosperar los cultivos tradicionales. Sólo las partes menos abruptas y cercanas a riachuelos, donde se encontraban pequeñas planicies aluviales fueron utilizadas para cultivar maíz. Fue hasta los últimas dos décadas que se llevaron prácticas de cultivo de pastizal llanero para el ganado (*Andropogon gayanus*) en laderas con pendientes de moderadas a fuertes (desde 17° y hasta los 38°) en donde los BTSC de la microcuenca de Chila sufrieron la mayor transformación. Este pasto de origen africano tiene entre diversas características, ser muy resistente a las sequías, ya que soporta hasta 9 meses sin lluvia, el ganado lo consume aún estando seco, es resistente a la quema y rebrota aún después de está; sin embargo no se recomienda su uso en fuertes pendientes porque propicia la erosión (www.sagarpa.gob.mx/dlg/michoacan/inifap/pasto_tdap.pdf). Las características de adaptación del pastizal llanero hicieron posible la introducción de éste en las laderas abruptas y carentes de agua de la zona de estudio, pero es posible que también hayan repercutido los cambios en el artículo 27 de la constitución, llevados a cabo a mediados de los años 90's, con los que los ejidatarios pueden vender o asociarse entre sí, con el Estado o con terceros para el manejo de sus tierras de forma particular sin el acuerdo de la sociedad ejidal (Mendoza et al., 2007).

Otra de las actividades agrícolas llevadas a cabo en la microcuenca de Chila, es el cultivos de narcóticos, práctica realizada de forma habitual. Esta actividad es de conocimiento común entre sus habitantes, los ingresos obtenidos por ella superan por mucho a los obtenidos en el cultivo de pastizales para el ganado o en el cultivo del maíz. Los habitantes asocian el narcotráfico con la migración a los Estados Unidos y sobre todo, con el “deseo inagotable de los gringos de consumir drogas” (Pérez-Prado, 2001).

Sin embargo la problemática de la zona es compleja, pues la problemática de falta de agua impide el desarrollo de actividades agrícolas, ya que plantar siempre es un riesgo, y dichas actividades no pueden llevarse a cabo sino hasta que inicia la estación de las lluvias y debido a lo breve del periodo pluvial, las cosechas suelen no prosperar durante varios ciclos (Stanislawski, 2007).

Actualmente la zona de estudio se encuentra dividida políticamente por dos municipios: Apatzingán y Aguililla. Según datos de INEGI en 1990 ambos presentaban un nivel medio de marginación. Sin embargo en el 2000 Apatzingan mejoró obteniendo un nivel bajo, mientras Aguililla aumentó a un nivel alto de marginación (Vargas et al., 2005).

Por lo anteriormente expuesto, el estudio de la vegetación en esta región representa un reto al ser un trabajo pionero, de gran valor debido a la inexistencia de trabajos antecedentes. Por otro lado la recopilación de la información de campo, es peligrosa debido al cultivo de enervantes en la zona de estudio. No obstante este tipo de investigaciones se considera importante, ya que el conocimiento de las especies del BTSC constituye el primer paso para futuras aplicaciones enfocadas al manejo y la conservación de dichos ecosistemas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo proporcionado por el Dr. Francisco Bautista y su equipo de colaboradores: Estela Carmona y Rosaura Páez por la información climatológica brindada para la zona de estudio. También agradezco el enorme apoyo de Pedro Urquijo en relación con la búsqueda de información de tipo histórico y social para el presente capítulo.

BIBLIOGRAFÍA

Baker A.R.H. 2003. Geography and History. Bridging the Divide, Cambridge. Cambridge. University Press. Pp. 209-227.

Barragán L. E. 2001. Formas Espaciales y proceso sociales en la Sierra del Tigre. Relaciones 85. Vol. XXII. 107-129 pp.

Bocco G. y Mendoza, M. La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo. Editores: Corona, P., Israde. Carta Geológica del Estado de Michoacán, Escala 1:250,000. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Departamento de Geología y Mineralogía. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo Morelia, Michoacán. México. 111pp.

Correa Pérez, G. 1974. Geografía del estado de Michoacán. Morelia, Gobierno del Estado de Michoacán. pp.230.

Delgado, M.C.; Bautista, F.; Orellana, R. y Reyes H. 2008. Regionalización agroclimática de estado de Yucatán, México utilizando la longitud del periodo de crecimiento y geoestadística. En revisión.

García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Libros. No. 6. 90 pp. México.

Garduño, V.H., Corona, P., Israde, I., Mennella, L., Arreygue, E., Bigioggero, B. y Chiesa, S. 1999. Carta Geológica del Estado de Michoacán, Escala 1:250,000. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Departamento de Geología y Mineralogía. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo Morelia, Michoacán. México. 111pp.

INEGI. 1990. Guías para la interpretación de Cartografía. Edafología. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Aguascalientes. México. 28 pp.

INEGI. 2007. Conjunto de Datos Vectoriales de la Carta Edafológica, Escala 1:250,000, Serie II. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. Aguascalientes, Ags., México.

Krasilnikov, P.V., García Calderón, N.E., Sedov, S.N., Vallejo Gómez, E. y Ramos Bello, R. 2005. The relationship between pedogenic and geomorphic processes in mountainous tropical forested area in Sierra Madre del Sur, Mexico. CATENA. Volume 62 (1): 14-44.

Lugo H.J. (1989). Diccionario Geomorfológico. Instituto de geografía. UNAM.

Maderey, L. E. y J. J. Carrillo, 2007, El recurso agua en México. Temas Selectos de la Geografía Mexicana. Sección Textos Monográficos. Instituto de Geografía de la UNAM. 128 pp.

Mendoza H., Urquijo P., Barrera-Bassols N. y Bocco, G. (2007). México y el cambio geográfico: Dos siglos de Historia (1810-2010). México en tres momentos: 1810-1910-2010. Hacia la conmemoración del Bicentenario de la Independencia y del Centenario del Revolución Mexicana. Retos y perspectivas. Vol. II. UNAM. México.

Ortega, F., Mitre-Salazar, L.M., Roldan-Quintana, J., Aranda-Gómez, J.J., Moran-Zenteno, D., Alaniz-Alvarez, S., y Nieto-Samaniego, A. F. 1992. Texto explicativo de la quinta edición de la carta Geológica de la República Mexicana escala 1:2,000,000. Instituto de Geología. Consejo de Recursos Minerales. SEMIP. Universidad Nacional Autónoma de México. 74 pp.

Palacio-Prieto, J.L., Bocco, G., Velázquez, A., Mas, J.F., Takaki-takaki, A., Victoria, A., Luna-Gonzalez, L., Gómez-Rodriguez, G., López-García, J.,

Palma, M., Trejo-Velázquez, I., Peralta, A., Prado-Molina, J., Rodríguez, A., Mayorga-Saucedo, & R., Gonzalez-Medrano, F. 2000. La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Nacional Forestal 2000. Investigaciones Geográficas. UNAM. 43:183-203.

Pérez L. N. 2001. Gente, Agua, Cultivos y Desarrollo. Desigualdad en el valle del Tepalcatepec: Imágenes, recuerdos y la “Memoria históricamente instruida”. Relaciones 87, Vol. XXII. Pp. 111-155.

Pérez-Prado, L. N. 2001. Gente, Agua, Cultivos y desarrollo. Desigual en el Valle del Tepalcatepec: Imágenes, recuerdos y la “Memoria históricamente instruida”. Relaciones 87. Vol. XXII.

Rzedowski, J. (1978) Vegetación de México. - Limusa, México. 432 pp.

Salazar, G. 2008. El Bosque Tropical Caducifolio en la microcuenca de San José de Chila, tributario del río Tepalcatepec, municipio de Apatzingan, Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Sánchez Díaz, G. (1987). Tierra y Agricultura comercial en la tierra Caliente de Michoacán 1820-1850. Tzintzun No. 8. Enero-Diciembre. IIH-U.M.S.N.H.17-32 pp.

Sánchez Díaz, G. (1988). El Suroeste de Michoacán: Economía y sociedad 1852-1910. Instituto de Investigaciones Históricas. Departamento de Investigaciones Históricas. U.M.S.N.H.

Sánchez Díaz, G. (1992). Propiedad, Agricultura y Sociedad en la Tierra Caliente: La hacienda de la Huerta en el siglo XIX. Tzintzun No. 16. Julio-Diciembre. IIH- U.M.S.N.H. 7-42 pp.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

SPP (1981). Secretaría de Programación y Presupuesto. Atlas Nacional de Medio Físico. SPP. México.

Stanislawski D. 2007. La anatomía de once pueblos. Universidad Nacional Autónoma de México. El Colegio de Michoacán. A.C.

Trejo, I. 1998. Distribución y Diversidad del Selvas Bajas de México: Relación con el Clima y el Suelo. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 210pp. México.

Vargas U. G, Navarro C. J. C. L., García G. J. O. y Contreras B. C. 2005. Realidad socioeconómica contemporánea. La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Gobierno del Estado de Michoacán. Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Capitulo 3. 47-53 pp.

EVALUACIÓN DE LOS ERRORES DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN OBTENIDOS POR INTERPOLACIÓN[†]

RESUMEN

Son pocos los estudios enfocados en la evaluación de los errores inherentes a los modelos digitales de elevación (MDE). Por esta razón, se evaluaron los errores de MDE obtenidos por diferentes programas de interpolación (ARC/INFO, IDRISI, ILWIS y NEW-MIEL) y con diferentes resoluciones, con la finalidad de obtener una representación del relieve más precisa. Esta evaluación de los métodos de interpolación es crucial, si se tiene en cuenta que los MDE son la forma más efectiva de representación de la superficie terrestre para el análisis del terreno y que son ampliamente utilizados en ciencias ambientales. Los resultados obtenidos muestran que la resolución, el algoritmo de interpolación y los insumos (curvas de nivel solas o con datos de escurrimientos y puntos acotados) influyen de manera importante la cantidad de error en el MDE. En el presente estudio, que se llevó a cabo con base a curvas de nivel cada 50 m en una zona montañosa, la resolución más idónea fue de 30 m. El MDE con el menor error (Error Medio Cuadrático - EMC - de 7.3 m) fue obtenido con ARC/INFO. Sin embargo, programas sin costo como NEW-MIEL o ILWIS permitieron la obtención de resultados con un EMC de 10 m.

Palabras clave: Modelos digitales de elevación, error, interpolación, relieve

[†] Aceptado en *Investigaciones Geográficas*

ABSTRACT

There have been few studies focused on assessing the errors inherent of digital elevation models (DEM). For this reason, the errors of DEM obtained by different programs of interpolation (ARC/INFO, IDRISI, ILWIS and NEW-MIEL) and with different resolutions, were evaluated in order to obtain a more precise representation of the relief. This evaluation of the methods of interpolation is crucial, because the DEMs are the most effective way of representation of the terrestrial surface for terrain analysis and are widely used in environmental sciences. The results show that the resolution, the interpolation algorithm and the inputs (contours only or along with streams and points) influence amount of error importantly. In the present study, carried out with 50 m contour data in a mountainous area, the most suitable resolution was 30 m. The MDE with the minor error (Root Mean Square Error - RMSE - of 7.3 m) was obtained by ARC/INFO. Nevertheless, free programmes such as NEW-MIEL or ILWIS allowed obtaining result with a RMSE of 10 m.

Key words: Digital elevation model, error, interpolation, relief.

INTRODUCCIÓN

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son definidos como una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud en la superficie terrestre, almacenados en una base de datos digital, georeferenciada en un sistema de proyección cartográfica con valores en x y y (Felicísimo, 1994). Es llamado modelo porque a través de algoritmos matemáticos, los datos altitudinales, pueden ser modelados automáticamente en una computadora y así lograr analizar la superficie terrestre en un modelo en tres dimensiones (Maune et al., 2001).

Actualmente los MDE constituyen una herramienta fundamental sobre todo en estudios para describir rasgos topográficos. Los MDE permiten de forma fácil la representación de las formas del relieve, la producción de cortes transversales, y la creación de animaciones en tres dimensiones. Además, el almacenamiento de la información digital no sufre deformaciones como sucede con los mapas convencionales, la integración y actualización de información adicional es realizada con menor trabajo y tiempo y la representación multiescalar y en diferentes resoluciones se realiza fácilmente (Li et al., 2005).

Existen diferentes nombres para designar a estos modelos: Modelo Digital de Terreno (MDT), Modelo Digital de Alturas (MDA); Modelo Digital de Suelo (GDM en inglés), Modelo Digital de Elevación del Terreno (MDET), Modelo Digital de Terreno (MDT), aunque en general son utilizados como sinónimos. Algunos textos determinan diferencias como es el caso del MDT, que además de presentar la información altitudinal incluye otros rasgos geográficos tales como pendiente, forma de la pendiente, escurrimientos, cuerpos de agua, línea de costa, vías de comunicación, asentamientos humanos entre otros (Li et al., 2005).

Otros autores consideran que el término más adecuado debería ser Datos de Elevación Digitales (DED), ya que esos datos sirven para generar posteriormente el modelo. Sin embargo debido, a lo establecido del término "MDE" en la literatura y para evitar mayor confusión, algunos autores optaron por conservarlo, lo cual se hizo también en el presente trabajo (Maune et al., 2001).

Los datos de elevación digital pueden ser divididos básicamente en tres grupos de acuerdo a su estructura: 1) Datos vectoriales: líneas y puntos (curvas de nivel y puntos acotados) obtenidos a partir de mapas topográficos, 2) Red irregular de triángulos construidos a través de la unión de tres puntos

adyacentes (TIN) y, 3) Datos en formato de celdas (*raster*), los cuales representan el valor medio de unidades elementales con una distribución regular (datos matriciales). Estos últimos fueron ampliamente utilizados en la última década debido a su simplicidad y la facilidad de almacenamiento y de procesamientos de la información (Wilson y Gallant, 2000).

La información altitudinal que conforma un MDE es obtenida a través de sistemas pasivos o activos o bien por mediciones directas. Los métodos pasivos como la interpretación de pares estereoscópicos de fotografías aéreas fueron los pioneros en la construcción de la información topográfica. Esta información fue posteriormente digitalizada y es la más frecuente en muchas partes del mundo ya que puede fácilmente incorporarse en un Sistema de Información Geográfica (SIG). En el caso de México, curvas de nivel digitalizadas (formato vector 1:50,000 y 1:250,000, INEGI) están disponibles para la totalidad del territorio. Sin embargo, dicha información altitudinal no es continua, por lo que dichos datos requieren de métodos de interpolación para generar información altitudinal continua como se presentará a continuación. Recientemente, ciertos sensores a bordo de satélites como ASTER (*Advance Space Borne Thermal Emisión and Reflection Radiometer*) o SPOT (*Système Probatoire d'Observation de la Terre*) tienen la capacidad de tomar pares estereoscópicos de imágenes, lo cual permite generar un MDE.

Desde hace algunos años, se desarrollaron sistemas activos como el Radar (*Radio Detection and Ranging*) y el Lidar (*Laser Imaging Detection and Ranging*) para adquirir información sobre la topografía. Estas tecnologías permiten determinar la distancia desde un emisor a un objeto o superficie utilizando una señal radar o laser. La distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada. Por ejemplo, sistemas de radar como el *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), producen MDE para el mundo entero

con una resolución cercana a los 30 m. Una versión con una resolución de 90 m está disponible para el público y es considerada uno de los mejores medios de información topográfica en la actualidad (Geoscience Australia, 2005). El Lidar permite generar modelos de elevación muy detallados pero no está aún desarrollado en México.

Finalmente, la obtención directa de datos altitudinales en el terreno a través de aparatos posicionadores GPS (*Global Positioning System*) es laboriosa y costosa por lo cual no puede ser utilizada para generar MDE sobre grandes extensiones.

En México, la información más susceptible de ser utilizada para generar MDE detallados a bajo costo es por lo tanto la información topográfica del INEGI a escala 1:50,000. Para generar un MDE en formato de celdas, esta información debe ser interpolada. Los métodos de interpolación utilizados para elaborar MDE consisten en la estimación altitudinal, a través de datos conocidos, discontinuos y en la mayoría de los casos distribuidos irregularmente, los cuales sirven para generar un nuevo conjunto de puntos localizados en los nodos de una red regular y continua, utilizando algoritmos matemáticos (Felicísimo, 1994). Los métodos de interpolación usados comúnmente son: ponderación en función inversa de la distancia, superficies de tendencia, kriging, triangulación, interpolación de parches locales, y rasterización adaptada localmente (*locally adaptive gridding*). Debido a que los modelos son una descripción aproximada de la realidad, y se construyen aplicando supuestos más o menos apegados a la realidad, nunca pueden ser exactos, por tanto la utilización de modelos conlleva diferentes fuentes de error donde las imprecisiones son inherentes (Felicísimo, 1994).

Existen diferentes fuentes de error en los MDE. El primero concierne a errores de los insumos utilizados para generar los mismos, como los errores posicionales (deficiente localización geográfica) de los puntos acotados o de

la trayectoria de la curva de nivel, afectando la información en XY; otro tipo de errores son los valores de altitud erróneos. Existen también los errores relacionados con el proceso de interpolación. Los errores más comunes son relacionados con la creación de hoyos (“pits”) o depresiones, estos son áreas rodeadas por celdas con mayor altitud y de picos (“peaks”), los cuales se encuentran rodeados por áreas o celdas con superficies más bajas. Con el fin de sistematizar estos errores, el Departamento de Investigaciones Geológicas de Estados Unidos (*U.S. Geological Survey*) reconoce que existen tres tipos de errores en los MDE que produce, siendo éstos: 1) Errores garrafales (“*blunders*”), 2) sistemáticos, y 3) no sistemáticos (aleatorios). Los *blunders* son errores verticales asociados al proceso de colección de datos, son identificados y removidos antes de dar a los usuarios los MDE. Los errores sistémicos son el resultado del procedimiento o sistema utilizado en el proceso de la generación de los MDE; en general presentan ciertos patrones que siguen un arreglo y pueden producir un sesgo en el producto final. Cuando la causa es conocida, los errores sistémicos son eliminados o reducidos. Por lo regular, los errores aleatorios permanecen en los MDE ya que su naturaleza y localización es poco entendida (Wechsler y Kroll, 2006).

Diferentes autores han propuesto métodos y técnicas para evaluar estos errores y eventualmente aminorarlos o corregirlos (Guercio y Soccodato, 1996; Jenson y Domingue, 1988; Hutchinson 1988, 1988b; Martz Garbrecht, 1998 y Rieger, 1998). Sin embargo los usuarios de los MDE frecuentemente no evalúan los efectos de los errores de los MDE (Wechsler, 2003) y los métodos para disminuir los errores no han sido sistemáticamente integrados a los programas de SIG (Wechsler y Kroll, 2006).

Generalmente, la evaluación de la calidad de los MDE se hace a través de la medición de error medio cuadrático (EMC) entre la elevación estimada por el MDE y mediciones muy precisas. Por ejemplo, Erten et al. (2005) realizaron

una evaluación de la calidad de los MDE obtenidos con imágenes ASTER y *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) contra MDE generados a partir de curvas de nivel a escala 1:25,000. La precisión de los MDE Aster fue mayor que los del SRTM en comparación con los datos altitudinales extraídos de los mapas topográficos, teniendo una máxima diferencia de 16 m en ASTER y 28 m en SRTM. Carlisle (2005) resaltó la importancia de ubicar espacialmente los errores de los MDE y realizó un modelado espacial del error, cuestionó la utilización de un único índice de error como el error medio cuadrático y la desviación estándar para describir los errores en los MDE. Wechsler y Kroll (2006) desarrollaron una metodología para evaluar la confiabilidad de los parámetros derivados de los MDE e integrar dicha metodología en un Sistema de Información Geográfica para usuarios.

Otros autores se enfocaron en comparar el desempeño de diferentes enfoques y métodos de interpolación (Krajewski y Gibas, 1994; Morillo-Barragán et al., 2002). En primer lugar, se demostró que la resolución del MDE interpolado tiene una influencia muy importante sobre su calidad. Otros trabajos mencionan que resoluciones bajas producen bajos gradientes de pendiente sobre pendientes fuertes y fuertes gradientes de pendiente sobre áreas planas. Sin embargo también concluyen que resoluciones altas no necesariamente implican modelos de paisaje mas útiles (Thompson et al., 2001). Kienzle (2004) establece que los resultados de la evolución de atributos como: elevación, pendiente, exposición, curvatura en planta y perfil y el índice de humedad, se modifican al cambiar el tamaño de la malla (resolución espacial del MDE).

Por otro lado la determinación de la resolución en un MDE no puede establecerse como una regla general para todos los estudios relacionados con el relieve, ya que ésta dependerá del tipo de relieve en estudio (planicies, montañas, valles, barrancos, etc.) (Theobald, 1989, Wood, 1994 y Weibel and Brändli, 1995 entre otros) y de la escala original de los datos

altitudinales. Hengl et al. (2003) proponen que la resolución de un MDE debe ser la mitad del espacio promedio entre curvas de nivel. Hutchinson (1996) propone un método gráfico para determinar la resolución óptima para la interpolación. Este método se basa en la medición del error medio cuadrático de la pendiente a diferentes resoluciones, siendo la resolución más idónea siendo la que no presenta una reducción importante de este error en comparación con el modelo de resolución más baja.

Finalmente, existen algunas técnicas para mejorar los MDE. Una de las más comunes consiste en aplicar filtros que reducen la magnitud de los errores, los cuales identifican condiciones anisotrópicas (donde la variación en una dirección es distinta en otra dirección) y establecen una homogeneidad con el conjunto que los rodea (Brown y Bara, 1994).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó un Modelo Digital de Elevación derivado de imágenes del sensor ASTER con una resolución de 30 m. El DEM se genera con base en un par estereoscópico de imágenes tomadas en el visible e infrarrojo cercano por dos telescopios a bordo del sensor: uno mirando al nadir, el otro hacia atrás (USGS, 2006). Los programas utilizados para llevar a cabo las interpolaciones fueron ARC/INFO, IDRISI, ILWIS y NEW-MIEL (tabla 1).

Tabla 1 - Programas utilizados en el presente estudio

Programa	Página web	Costo	Algoritmo de interpolación
ARC/INFO	www.esri.com	US \$ 10,000 aprox. *	ANUDEM (Hutchinson, 1988)
IDRISI	www.clarklabs.org	US \$ 675 *	CONSURF (Douglas, 2000)
ILWIS	www.itc.nl/ilwis/	sin costo	-
NEW-MIEL	http://www.igeograf.unam.mx	sin costo	New-miel (Parrot y Ochoa Tejeda, 2005)

* Precio académico

Se generaron curvas de nivel y puntos acotados a partir del MDE Aster con una separación entre curvas de nivel de 50 m, considerando la resolución del MDE es de 30m. Esta información fue utilizada para llevar a cabo la interpolación en los diferentes programas y a las diferentes resoluciones. Finalmente se comparó el MDE ASTER original con los diferentes MDE obtenidos (Figura 1).

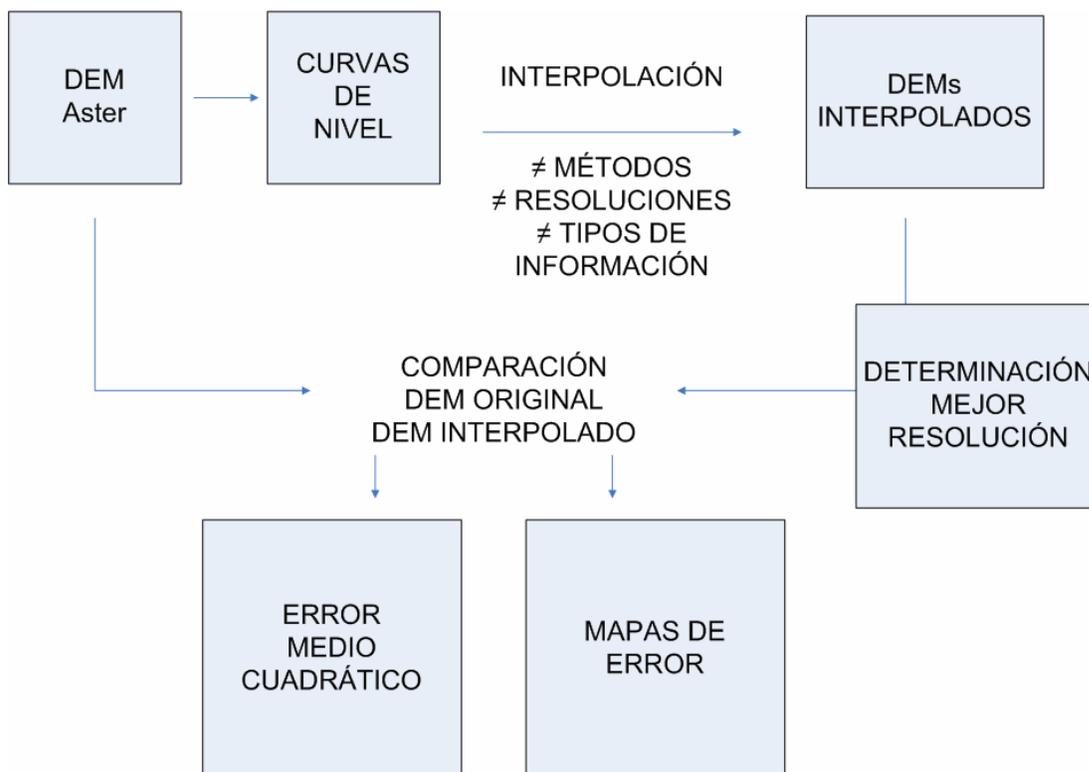


Figura 1 - Diagrama de flujo mostrando los principales procesos del estudio.

Los métodos de interpolación de ILWIS y NEW-MIEL se basan en una interpolación lineal con base en la elevación de las dos curvas de nivel más cercanas. Para cada píxel ubicado entre dos curvas, el algoritmo determina las distancias mínimas que lo separan de la curva inferior y superior. La elevación de este píxel se estima como se indica a continuación (ecuación 1 y figura 2).

$$e_p = e_i + d_i \frac{(e_s - e_i)}{(d_i + d_s)} \quad (1)$$

Donde:

e_p es el valor de la elevación del píxel objeto de la interpolación,

d_i y e_i son respectivamente la distancia mínima a la curva de elevación inferior y el valor altitudinal de dicha curva,

d_s y e_s son respectivamente la distancia mínima a la curva de elevación superior y el valor altitudinal de dicha curva.

Para los píxeles ubicados en una zona cerrada, ILWIS afecta la elevación de la curva de nivel a todos los píxeles (formación de un “plateau”) mientras que NEW-MIEL utiliza un algoritmo de dilatación de curvas (Taud et al., 1999) para calcular estos valores si existe un punto acotado.

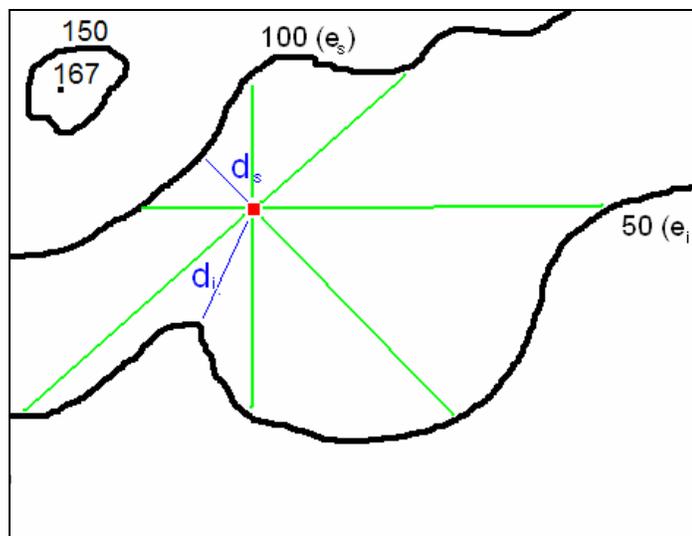


Figura 2 - Métodos de interpolación lineal. Para determinar el valor de elevación del píxel interpolado (cuadro rojo), ILWIS y New-miel usan las distancias mínimas a las curvas de nivel inferior y superior (d_i y d_s en azul) mientras que IDRISI utiliza distancias en direcciones preestablecidas (en verde). La curva de 150 m forma una región cerrada con un punto acotado (a 167 m).

El método de interpolación de IDRISI es una modificación de CONSURF (Douglas, 2000), también basado en una interpolación lineal entre puntos pertenecientes a curvas de nivel. En este algoritmo, en vez de calcular la

distancia más corta a las curvas de nivel se construyen perfiles verticales, horizontales y en diagonal (figura 3). La elevación que se retiene es aquella que corresponde al perfil con más pendiente.

El algoritmo de interpolación de Arc/Info (TOPOGRID) es un método de interpolación diseñado específicamente para la creación de modelos digitales del terreno. Está basado en el algoritmo ANUDEM desarrollado por Hutchinson (1988). Es un método de interpolación multiresolución, empieza con un raster de baja resolución y continúa hasta la resolución predefinida por el usuario. Este procedimiento de interpolación cuenta con las ventajas de aquellos algoritmos locales, como el gravitacional (Inverso del Cuadrado de la Distancia), y la de los algoritmos globales de las curvas adaptativas (“*splines*”). En resumen, la técnica de interpolación desarrollada está basada en el método de curvas adaptativas (“*thin plate splines*”) modificado en cuanto al cálculo de la rugosidad para conseguir que el modelo se ajuste a los bruscos cambios de pendiente. Permite utilizar curvas de nivel, puntos acotados y datos de corrientes, permitiendo así que la interpolación respete la red de drenaje.

Comparamos los resultados obtenidos por la interpolación de los cuatro programas (ARC/INFO, ILWIS, IDRISI y NEW-MIEL) con 5 diferentes resoluciones (20, 30, 50, 70 y 100 m) con el MDE de referencia que se utilizó para generar las curvas de nivel (Figura 2).

La interpolación para generar el MDE en los diferentes programas se llevó a cabo básicamente con dos tipos de información: 1) curvas de nivel y 2) curvas de nivel más puntos acotados. El programa ARC/INFO permitió llevar a cabo la interpolación agregando información de las corrientes fluviales (información vector, INEGI). Al contrario, con ILWIS solo se puede realizar la interpolación con una sola capa de información (curvas de nivel).

La determinación de la resolución más adecuada para la representación del relieve fue a través de la representación gráfica del error medio cuadrático, obtenido de la diferencia altitudinal entre cada DEM obtenido por interpolación y el DEM de referencia. El error es la raíz cuadrada del promedio del conjunto de cuadrados de las diferencias entre los dos MDEs (MDE de referencia y generado en cada programa a cada resolución).

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - E_i)^2}{n}} \quad (2)$$

Donde

e_i es la elevación en la localización i del MDE obtenido por interpolación y, E_i es la elevación en el modelo de referencia para la misma localización i .

A través de los resultados obtenidos de los EMC en los diferentes programas se determinó la resolución que permitió generar un DEM con menos error. Otra alternativa en la determinación de la mejor resolución fue obtenida a través del método de Hutchinson (1996). Este método se basa en el hecho que los MDE realizados con una baja resolución agrupan y promedian los valores de elevación de diferentes curvas o puntos acotados y por consecuencia tienden a subestimar la pendiente. El método consiste por lo tanto en realizar la interpolación a diferentes resoluciones y observar el comportamiento de la pendiente (a través del error medio cuadrático de la misma) en función de la resolución. Según Hutchinson, esta curva presenta un quiebre que permite identificar la resolución idónea para la interpolación (figura 3). Hutchinson y Gallant (2000) aplicaron este método pero no encontraron una curva muy fácil de interpretar.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

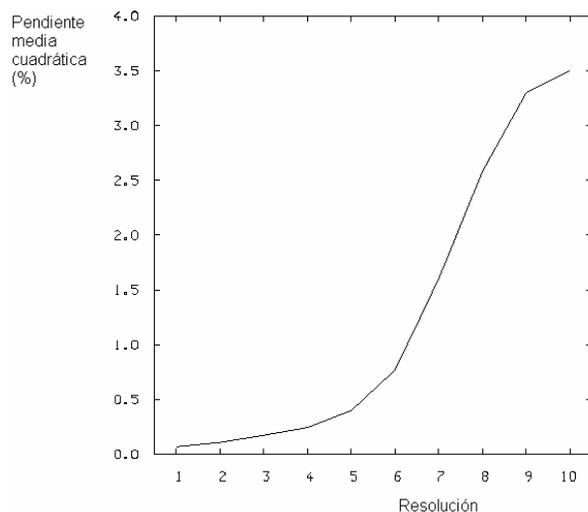


Figura 3 - Método de Hutchinson para determinar la resolución óptima para la interpolación. Se observa un quiebre de la curva para la resolución 9 que se considera como la más adecuada. Modificado de Hutchinson (1996).

Posteriormente se realizaron comparaciones entre las interpolaciones obtenidas por cada programa con la resolución más adecuada y el MDE de referencia, pretendiendo con ello, visualizar distribución espacial del error de los MDE obtenidos por los diferentes programas con el fin de poder observar si los errores están asociados a determinadas formas del relieve.

Para elaborar los mapas de error, se agruparon los valores de error con base en la desviación estándar del mismo. Los errores cercanos a los valores del MDE de referencia se consideraron aceptables, lo cual fue establecido con base en la desviación estándar del conjunto total de los datos. Los valores de error más grandes (error superior a una desviación estándar) negativos y positivos se agruparon en dos niveles cada uno (error bajo y alto).

Posteriormente se elaboró un perfil, el cual cruzó el área con los errores más altos y con una mayor superficie con la finalidad de entender el comportamiento de los diferentes algoritmos de interpolación en el área de estudio.

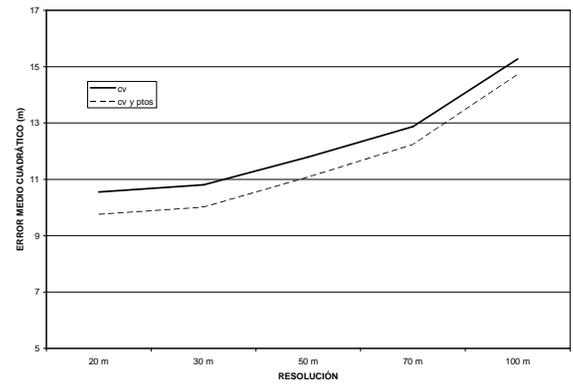
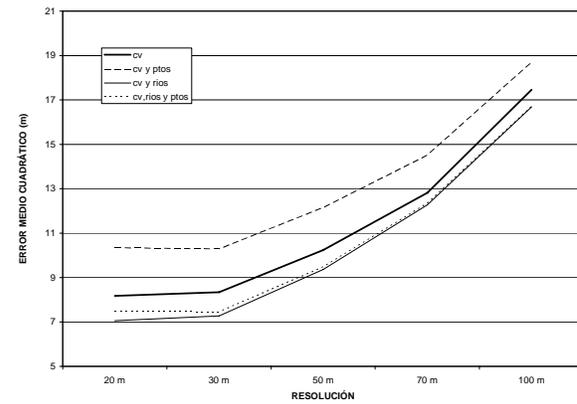
Finalmente, seleccionando tanto la resolución más adecuada como el programa de interpolación con mayor precisión, se elaboraran los diferentes mapas de representación del relieve (altitud, pendiente, exposición y curvatura en planta). Sin embargo los mapas antes citados solo tendrá sentido su elaboración en función de los resultados del capítulo siguiente, donde se determinarán los atributos del relieve que resulten con un relación entre los atributos del relieve y la distribución del BTSC en la zona de estudio.

RESULTADOS

El cálculo del error medio cuadrático de los MDE obtenidos por interpolación en cada uno de los cuatro programas (ARC/INFO, NEW-MIEL, IDRISI e ILWIS) a diferentes resoluciones (figura 4), mostró que en los programas ARC/INFO y NEW-MIEL, fue posible determinar que las resoluciones entre 20 m y 30 m son las más adecuadas. Dichas resoluciones permitieron obtener errores menores que las resoluciones más gruesas. La reducción del error con una resolución de 20 m en vez de 30 m es mínima. La gráfica para IDRISI fue muy diferente, mostró mayor error en la resolución más fina (20 m). En cuanto al programa ILWIS, no fue posible ver que la pendiente de la curva tuviera una estabilización clara para alguna de las resoluciones, sin embargo el error mostrado en una resolución de 20m, lo coloca en el segundo más bajo después de ARC/INFO.

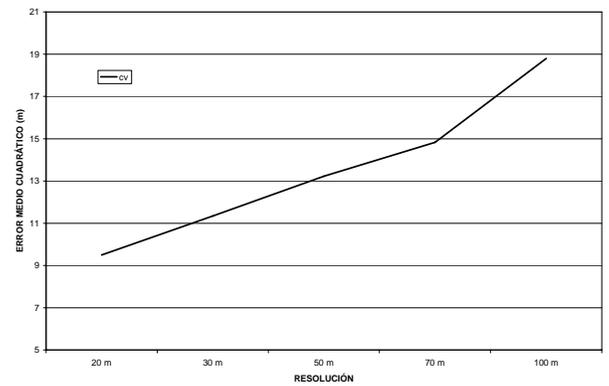
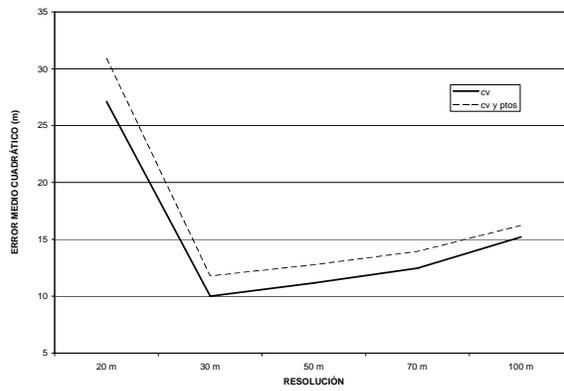
El método de Hutchinson (1996) por su parte mostró que la resolución, para la cual el aumento de la media cuadrática de la pendiente presenta un quiebre está alrededor de 30 m, siendo ésta la resolución más adecuada para interpolar los datos (figura 5).

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad



ARC/INFO

NEW-MIEL



IDRISI

ILWIS

Figura 4 - Error medio cuadrático de los MDE obtenidos por los cuatro programas a diferentes resoluciones. La leyenda corresponde: cv= curvas; cv y ptos = curvas y puntos.

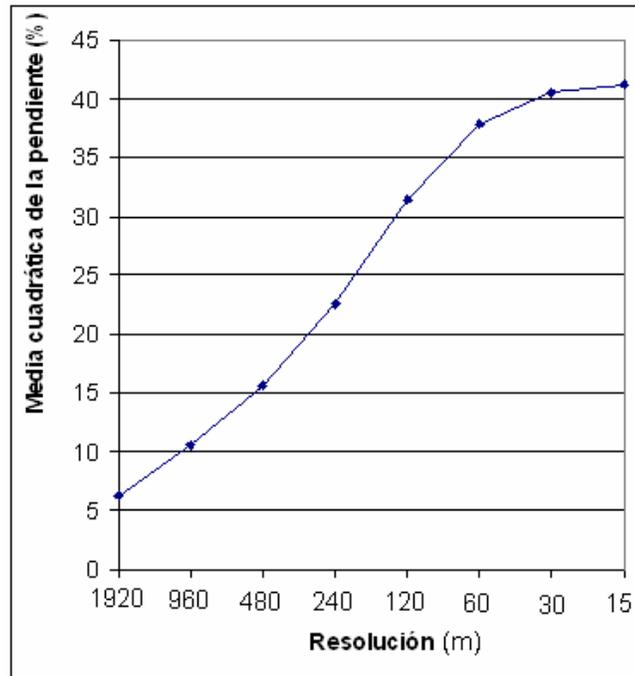


Figura 5 - Determinación de la resolución óptima para la interpolación. De acuerdo a Hutchinson (1996), la figura sugiere que la resolución más idónea es de 30 m. (interpolaciones realizadas con el algoritmo ANUDEM en ARC/INFO).

Para ARC/INFO e IDRISI, el desempeño de la interpolación fue mejor al utilizar sólo la información de las curvas de nivel (EMC de 8.3 m y 10 m respectivamente) que agregando la información de los puntos acotados (EMC de 10.3 y 11.8 m) (Figura 7). Solo el programa NEW-MIEL tuvo un mejor resultado utilizando los datos de curvas y los puntos acotados (EMC de 10.0 m con curvas y puntos contra 10.8 m con curvas únicamente). El resultado obtenido con ILWIS dio un EMC de 11.3 m, siendo el mayor error en comparación con los demás programas aunque con la resolución de 20 m presenta resultados similares a los obtenidos por NEW-MIEL. Por otro lado, ARC/INFO tiene la posibilidad de insertar información de las corrientes fluviales para llevar a cabo la interpolación, lo cual redujo el error hasta 7.3 m (Figura 6).

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

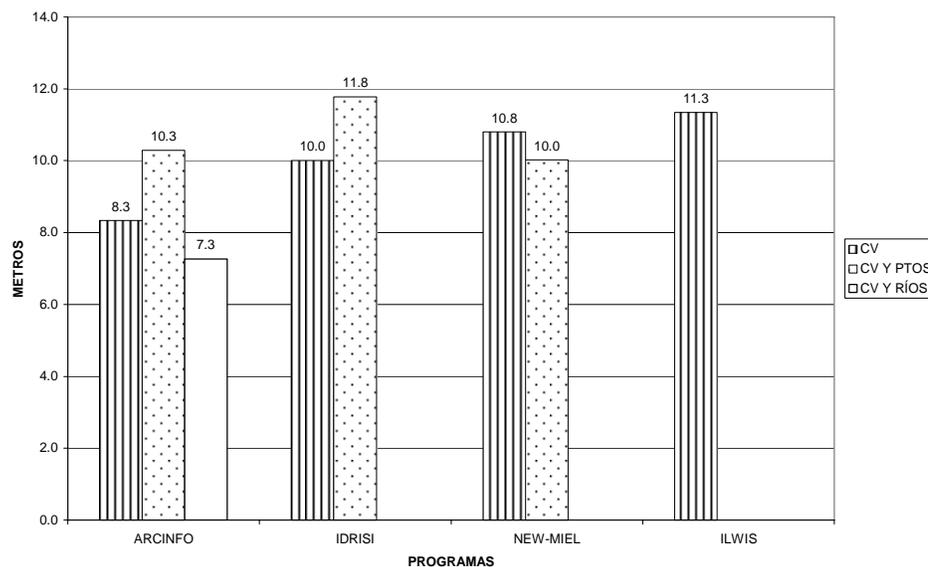


Figura 6 - Gráficas comparativas del error medio cuadrático entre los cuatro programas para la resolución de 30 m. La leyenda corresponde: CV= curvas; CV Y PTOS = curvas y puntos; y CV Y RÍOS = curvas y ríos.

Los valores del EMC fueron agrupados en 5 rangos para visualizar espacialmente los errores. Para ello, se tomaron en cuenta los errores de la interpolación solo con curvas de nivel y a una resolución de 30 m. La umbralización de los valores se hizo con base en la desviación estándar del error, la cual determinó los errores aceptables, siendo éstos inferiores a 10 m (tanto positivos y negativos). Los otros cuatro rangos fueron establecidos considerando los valores máximo y mínimo, los cuales fueron 46.1 m y -49.8 respectivamente (tabla 2). Se consideran los errores positivos y negativos cuando el MDE interpolado está respectivamente por arriba y por debajo de la elevación real (Figura 7).

Tabla 2 - Clasificación de los valores de error

Rangos de los valores de error (m)	Color en la figura 10	Tipo de error
-10 a 10	Blanco	Errores "aceptables"
Inferior a -20	Azul fuerte	Errores negativos altos
-20 a - 10	Azul claro	Errores negativos moderados
10 a 20	Naranja	Errores positivos moderados
Más de 20	Rojo	Errores positivos altos

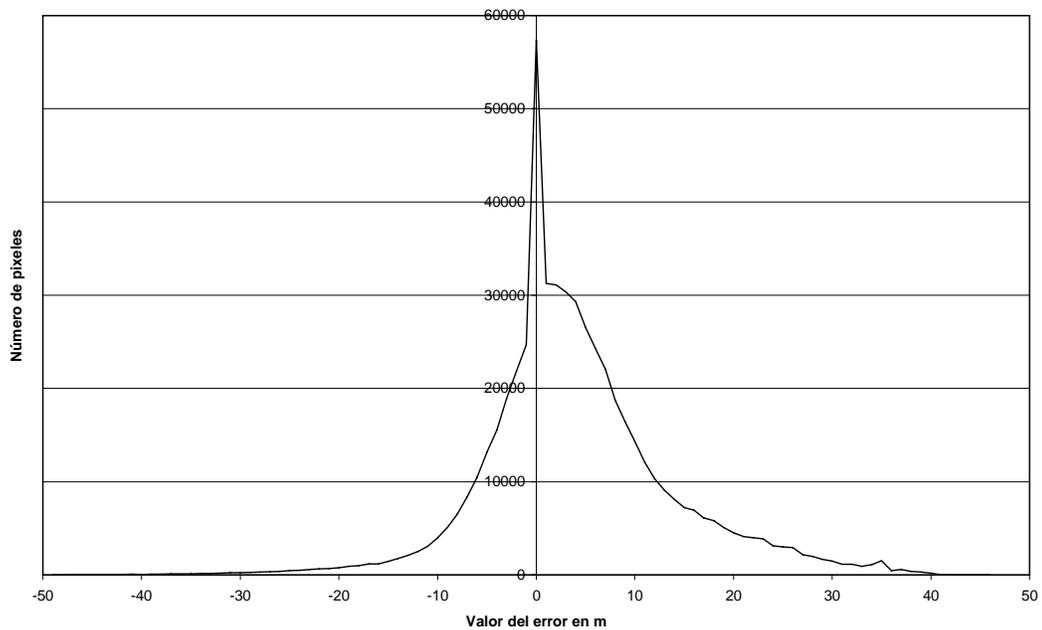


Figura 7 - Histograma de frecuencia de los valores de error. El pico correspondiente a valor de error nulo corresponde a los píxeles de las curvas de nivel.

Los errores se ubicaron principalmente en las zonas con pendiente muy baja (planicies y planicies aluviales) y en las cimas. En las zonas con pendiente moderada a fuerte (laderas) los errores son mínimos (en blanco), sin embargo el programa ILWIS fue el único que presentó errores negativos bajos (azul claro) en zonas de laderas (Figura 8).

Los errores positivos en ARC/INFO en colores naranja y rojo se ubican predominantemente en la planicie (porción noreste de la zona), y es muy evidente que al agregar los datos de los puntos acotados en la interpolación, en esta misma zona aumentan de forma considerable las superficies de error positivo.

La distribución espacial del error al utilizar la información de las corrientes fluviales para ARC/INFO, muestra una disminución importante de los errores positivos (naranja y rojo) de forma considerable en la zona de la planicie y las planicies aluviales, mostrando ARC/INFO el menor error en comparación con los otros programas.

Los errores positivos en IDRISI y NEW-MIEL (naranja y rojo) ocupan mayor superficie en la zona de la planicie noreste y las planicies aluviales en comparación con ARC/INFO e ILWIS (Figura 8). Sin embargo en la interpolación de NEW-MIEL al utilizar los puntos acotados y las curvas de nivel, la superficie de dichos errores disminuye para la porción de la planicie noreste cercana al punto acotado. En contraste IDRISI mantiene casi las mismas superficies de error para ambos tipos de interpolación. En este programa son notables los artefactos en forma de estrella producidos por el método de búsqueda de las curvas vecinas en direcciones predeterminadas. El perfil se ubicó en la planicie aluvial ubicada en la porción noreste de la zona de estudio donde los errores fueron mayores (Figura 8).

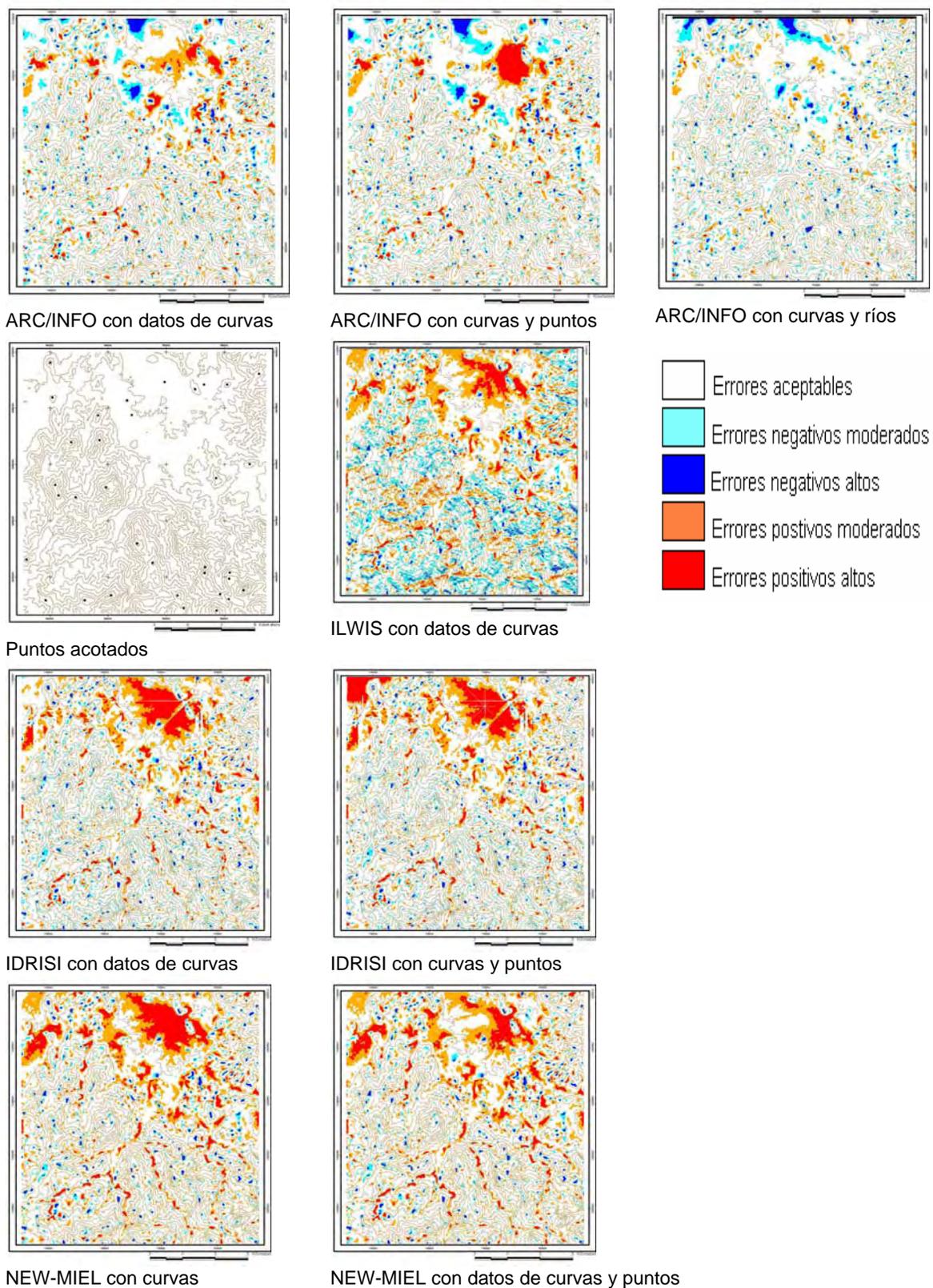


Figura 8 - Distribución espacial del error (reagrupado en cinco categorías) de los MDE obtenidos utilizando diferentes programas e insumos en una resolución de 30m.

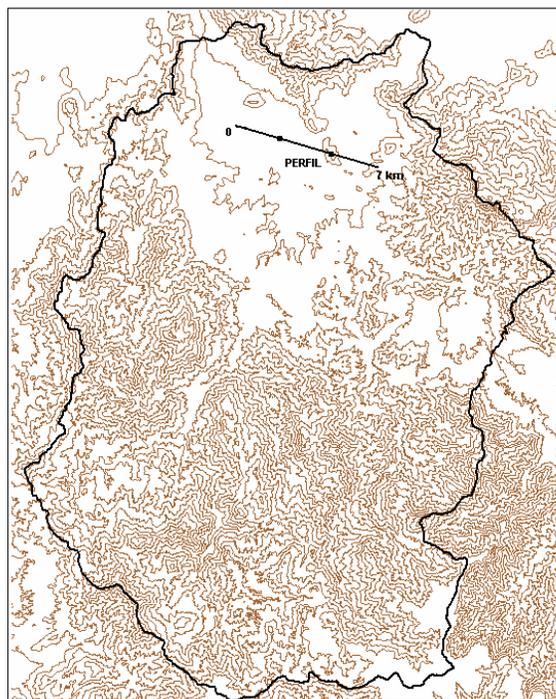


Figura 9 - Ubicación del perfil dentro del área de estudio.

El perfil para ARC/INFO (Figura 9) mostró que el algoritmo utilizado para interpolar curvas y puntos acotados, trata de generar perfiles que pasen por los puntos cuya elevación es conocida (curvas y puntos acotados) con poca curvatura. La introducción del punto acotado incrementó considerablemente los errores con un error positivo que alcanzó hasta 60 m (con la interpolación sólo con curvas este error era de 21 m) y un error negativo de hasta -22 m mientras los producidos solo con la interpolación con curvas de nivel fue -9 m (Figura 10).

Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por interpolación

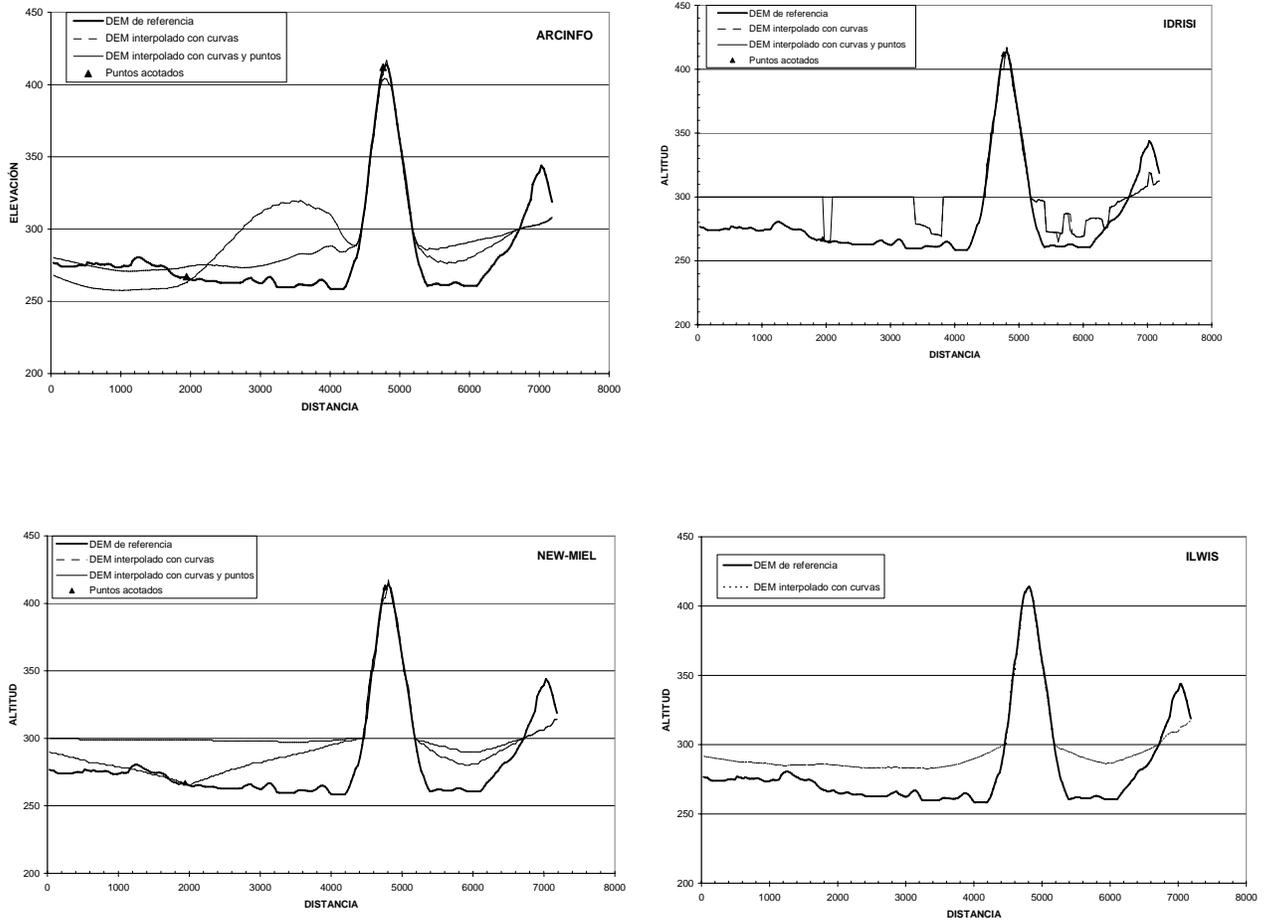


Figura 10 - Gráficas del perfil que representan las diferencias altitudinales entre los DEMs interpolados en los diferentes programas con una resolución de 30 m y el DEM de referencia.

La gráfica correspondiente a IDRISI muestra cómo de forma general los errores de los MDE producidos con curvas de nivel y curvas de nivel más puntos son muy parecidos. Sin embargo el algoritmo de IDRISI realiza una corrección de la elevación a partir de puntos acotados, pero si estos coinciden con las direcciones de búsqueda. De manera general, el perfil presenta cambios abruptos que no corresponden a la realidad y que corresponden a los defectos en forma de estrella que se observan en la figura 10. Por su parte NEW-MIEL, al llevar a cabo la interpolación con curvas de nivel y puntos, disminuye los errores al crear líneas rectas entre los puntos cuya altura es conocida. Es el único programa que disminuyó los errores utilizando los datos de puntos acotados. Por último en ILWIS sólo se presenta los datos con curvas de nivel, porque como se mencionó anteriormente solo es posible interpolar con curvas de nivel.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La evaluación de los errores inherentes a los procesos de interpolación así como la determinación de la resolución adecuada, son aspectos de suma importancia en la representación del relieve. En el presente estudio, la resolución más adecuada utilizando curvas de nivel cada 50 m fue de 30 m. El método de Hutchinson (1996) permitió definir la resolución más idónea para llevar a cabo la interpolación.

Para el presente trabajo los programas que presentaron menor error medio cuadrático fueron ARC/INFO y NEW-MIEL en relación al MDE de referencia (imágenes ASTER), siendo éste último el único programa que mejoró sus resultados al agregar la capa de información de puntos acotados.

Sin embargo los mejores resultados fueron obtenidos con el programa ARC/INFO, utilizando la información de los escurrimientos (y omitiendo los puntos acotados), lo cual permitió reducir de manera importante los errores en la zona de planicies. Sin embargo, ARC/INFO es un Sistema de Información con un alto costo de adquisición a diferencia de NEW-MIEL que es gratuito y disponible en línea.

La distribución espacial del error que mostraron los diferentes programas depende del algoritmo de interpolación utilizado. En el caso de IDRISI, el MDE presenta errores muy burdos. ARC/INFO al generar perfiles con una curvatura reducida en los puntos de elevación conocida produce una superficie curvada entre formas de laderas y planicies, lo cual provoca resultados con errores de importante magnitud.

En los cuatro programas utilizados las diferentes capas de información presentan los mayores errores en superficies de baja pendiente (planicies y cimas) con errores positivos; inversamente las superficies con pendientes fuerte (laderas) mostraron una diferencia de error muy baja, excepto para el programa ILWIS.

El análisis y comparación de los errores en los MDE, nos muestran un rango de error entre 7.3 a 11.3 m para los cuatro paquetes utilizados con la combinación de las diferentes capas que fueron interpoladas, y nos permite observar que los algoritmos utilizados para dicho fin, todavía requieren de un mayor perfeccionamiento para lograr sobre todo que las superficies planas y de baja pendiente sean representadas con una mayor calidad.

Finalmente, es notable que la elaboración de MDE sin búsqueda de la resolución más idónea y el uso de los MDE sin ningún análisis de la calidad de los mismos, pueden conllevar a errores importantes, representando formas del relieve ajenas a la realidad.

REFERENCIAS

Bocco, G., M. Mendoza, A. Velázquez y A. Torres (1999), "La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo", *Investigaciones Geográficas* núm. 40, pp. 7-21.

Brown, D. B. y T. J. Bara (1994), "Recognition and reduction of systematic error in elevation and derivate surfaces from 7 ½- minute DEMs", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 60, pp. 189-194.

Carlisle, B. (2005), "Modelling the spatial distribution of DEM Error", *Transactions in GIS*, Vol. 9, núm 4, pp. 521-540.

Carter, J.R. (1988), "Digital representations of topographic surfaces", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 54, pp. 1577-1580.

Douglas, D.H. (2000), "CONSURF, the Douglas contour to grid methodology" <http://www.hig.se/~dds/research/consurf/consurf1.htm>: 10 de octubre 2007.

Erten, E., N. Musaoğlu y A. Hervía (2005), "Quality assessment of digital elevation model produced from ASTER images", Proceedings of the 6th Geomatic Week, Barcelona, 8-11 February 2005.

Felicísimo, A. (1994), "Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales", <http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>: 14 de enero 2008.

García, E. (2004), "Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Copen". Serie Libros. No. 6. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Garduño, V.H., P. Corona, I. Israde, L. Mennella, E. Arreygue, B. Bigioggero y S. Chiesa. (1999), Carta Geológica del Estado de Michoacán, escala 1:250,000. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Departamento de Geología y Mineralogía. Morelia, Michoacán, México. 111p.

Geoscience Australia (2005), "Geodata 9 Second DEM Version 2". Disponible en línea: http://www.ga.gov.au/nmd/products/digidat/dem_9s.htm: 14 de enero de 2008.

Hengl, T., S. Gruber y D.P. Shrestha (2004), "Reduction of errors in digital terrain parameters used in soil-landscape modeling", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, núm 5, pp. 97-112.

Hutchinson, M. F. (1996), "A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models", Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, NM, January 21-26, 1996. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis.

Hutchinson, M. y J. Gallant (2000) "Digital Elevation Models and Representation of Terrain Shape" in *Terrain Analysis. Principles and Applications*. Ed. Wilson y Gallant. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 479 p.

Hutchinson, M.F. (1988), "Calculation of hydrologically sound digital elevation models", *Proceedings of the Third International Symposium on Spatial Data Handling*, August 17-19, Sydney. International Geographical Union, Columbus, Ohio, pp. 117-133.

Hutchinson, M.F. (1997), "ANUDEM. Versión 5.2.", Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra, Australia, <http://cres.anu.edu.au/outputs/anudem.php>: 14 de enero de 2008.

Kienzle, S. (2004), "The Effect of DEM Raster Resolution on First Order, Second Order and Compound Terrain Derivatives", *Transactions in GIS*, Vol. 8, núm. 1, pp. 83-11.

Krajewski, S.A. y B.L. Gibbs (1994), "Computer contouring generates artifacts", *Geotimes*, núm. 39, pp. 15-19.

Kumler, M. P. (1994), "An intensive comparison of triangulated irregular networks (TINs) and digital elevation models", *Cartographica*, vol. 31, núm. 2, pp. 1-48.

Li, Z., Q. Zhu y C. Gold, (2005), "Digital Terrain Modeling, Principles and Methodology", CRC Press. Boca Raton Florida, USA. 392 p.

Maune, D. F. (editor) (2001), "Digital Elevation Model Technologies and Applications : The DEM Users Manual", The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. USA. 540 p.

Morillo, J., J. Pozo, F. Pérez, M.C. Rodríguez, F. Gordillo y J. Rebollo (2002), "Análisis de calidad de un modelo digital de elevaciones generado con distintas técnicas de interpolación", XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Santander, España, 5-7 junio de 2002. <http://departamentos.unican.es/digteg/ingegraf/cd/ponencias/11.pdf>: 14 de enero de 2008.

Parrot, J.F. y V. Ochoa, (2005), “Generación de Modelos Digitales de Terreno Raster, Método de Digitalización”, *Geografía para el siglo XXI*, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 31 p. Disponible en línea en http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/manual_mde/index.html : 10 de octubre de 2007.

Rieger, W. (1998), “A phenomenon-based approach to upslope contributing area and depressions in DEMs”, *Hydrol. Processes*, núm. 12, pp. 857–872.

Rzedowski, J. (1978), “Vegetación de México”, Edición Limusa, México. 432 p.

Taud, H., J. F. Parrot y R. Alvarez (1999), “DEM generation with contour line dilation”, *Computers and Geosciences*, Vol. 25, núm. 7, pp. 775-783.

Theobald, D.M. (1989), “Accuracy and bias issues in surface representation”, In Goodchild M.F. y Gopal S. (Editores). *The Accuracy of Spatial Databases*. London, Taylor and Francis, pp. 99-106.

Thompson, J. A., J. C. Bell, y C. A. Butler (2001), “Digital elevation model resolution: Effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling”, *Geoderma*, núm. 100, pp. 67-89.

USGS (2006), “ASTER Digital Elevation Model”, <http://edcdaac.usgs.gov/aster/ast14dem.asp>: 14 de enero de 2008.

Wechsler, S. (2003), “Perceptions of digital elevation model uncertainty by DEM users”, *Urban and Regional Information Systems Association Journal*, Vol. 15, núm. 2, pp. 57-64.

Wechsler, S. y C. Kroll (2006), “Quantifying DEM Uncertainty and its Effect on Topographic Parameters”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 72, núm.. 9, pp. 1081-1090.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

Weibel, R. y M. Brändli, (1995), "Adaptive methods for the refinement of digital terrain models for geomorphometric applications", *Zeitschrift für Geomorphologie*. Núm. 11, pp. 13-30.

Weibel, R. y M. Heller (1991), "Digital terrain modeling", in D.J. Maguire, M.F. Goodchild, y D. W. Rhind (eds.), *Geographic Information Systems*, Vol. 1: Principles. Harlow: Longman. London, UK. 269-97p.

Wilson, J.P. y J.C. Gallant (2000), "Digital Terrain Analysis. Terrain Analysis. Principles and Applications". Ed. Wilson y Gallant. John Wiley & Sons, New York, USA. 479 p.

Wood J.D., (1994), "Visualising contour interpolation accuracy in digital elevation models", in Herarnshaw H.M. y Unwin D.J. (eds) *Visualization in Geographical Information Systems*. John Wiley & Sons. Chichester, UK., pp. 168-180.

**DISTRIBUCIÓN DE LAS ASOCIACIONES DE UN BOSQUE
TROPICAL SECO CADUCIFOLIO A TRAVÉS DE
GRADIENTES: RELIEVE, LITOLOGÍA Y SUELO DESDE UNA
PERSPECTIVA FITOSOCIOLÓGICA Y ESPACIAL EN
MICHOACÁN, MEXICO ³**

**DISTRIBUTION OF TROPICAL DRY FOREST ASSOCIATIONS
ALONG GRADIENTS: RELIEF, LITHOLOGY AND SOIL FROM
A PHYTOSOCIOLOGICAL AND SPATIAL PERSPECTIVE IN
MICHOACAN, MEXICO**

ABSTRACT

This paper documents a thorough phytosociological analysis of a watershed in Sierra Madre del Sur where tropical dry deciduous forest types prevail. Special focus is given to distinguished plant communities, and to identify environmental variables that best explain current catenal distribution, giving more emphasis on relief attributes. In addition, a detailed physiognomic characterization, floristic composition and environmental description is provided for all plant communities. In total 37 relevés (20 by 20 m) were made collecting data of all individuals ≥ 3 m high, along with data on elevation, soil texture, soil depth and anthropogenic activity. Classification (Twinspan) and ordination (DCA and CCA) multivariate analyses were performed in tandem with Chi^2 and G tests to measure the weight of the variables and to discriminate (dis)similarities among plant communities.

³ Sometido a *Phytocoenologia* en proceso de revisión.

In this tropical dry deciduous forest four plant communities were distinguished, namely: 1. *Lysiloma acapulcensis-Dalbergia granadillo*; 2. *Amphipterygium adstringens-Randia Laevigata*; 3. *Luehea candida-Bauhinia divaricata* and 4. *Caesalpinia platyloba-Caesalpinia eriostachys*. Results conclude that lithology (acid volcanic Toba -0.937, Granite -0.680, and schist 0.770); elevation (0.635) and soil depth (0.558) are the variables that best explain plant community distribution patterns. Outcomes of this contribution are discussed in light of their relevance for management and conservation actions of this vulnerable ecosystem.

RESUMEN

El presente trabajo documenta, un estudio de corte fitosociológico en una cuenca perteneciente a la Sierra Madre del Sur, donde predominan los Bosques Tropicales Secos Caducifolios (BTSC). En especial, este artículo se centra en distinguir las asociaciones del BTSC, identificando los atributos que mejor explican los patrones de distribución catenal de dichas asociaciones, dando mayor énfasis a los atributos del relieve, para finalmente llevar a cabo una caracterización de la fisonomía, composición florística y ambiental de las asociaciones presentes en el BTSC de la zona de estudio. El análisis de vegetación se elaboró a través de 37 relevés (20m X 20m), tomando información de individuos $\geq 3m$ y recopilando información: altitud, litología, curvatura en planta, pendiente, exposición, posición de ladera, profundidad y textura del suelo; así como atributos de tipo antrópico.

Se realizaron análisis con base en métodos de ordenación de similitud y disimilitud de especies (TWINSPAN, DCA y CCA) y pruebas de χ^2 y G para medir el peso de las variables y las afinidades entre comunidades de plantas. El BTSC se agrupó en 4 asociaciones: 1. *Lysiloma acapulcensis-Dalbergia granadillo*; 2. *Amphipterygium adstringens-Randia Laevigata*;

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

3. *Luehea candida-Bauhinia divaricata* y 4. *Caesalpinia platyloba-Caesalpinia eriostachys*. Los resultados del análisis arrojaron que la litología (toba volcánica ácida -0.937, granito -0.680, y esquisto 0.770), altitud (0.635) y profundidad del suelo (0.558) están fuertemente correlacionados con la distribución de especies. Las contribuciones son discutidas a la luz de sus implicaciones en el manejo y conservación de estos ecosistemas altamente vulnerables.

Palabras claves: Geobotánica, sinecología, clasificación, ordenación, vegetación tropical seca.

Keywords: geobotany, sinecology, classification, ordination, tropical dry vegetation.

INTRODUCCIÓN

Marco conceptual

Los bosques tropicales albergan la mayor diversidad biológica del mundo (TERBORGH 1992; MARTÍNEZ-RAMOS 1995). Así, países como Indonesia, Brasil, Colombia, Australia y México destacan por la presencia de bosques tropicales en mayor o menor grado de conservación (FAO, 2004; www.maweb.org/documents/document.290.aspx.pdf). De acuerdo a GENTRY (1988) se acepta que existen dos grandes categorías de bosques tropicales, a saber: los húmedos siempre verdes o perennifolios (BTHP) cubriendo alrededor de un 52% de la superficie mundial de los bosques tropicales; y los secos deciduos o caducifolios (BTSC) quienes según MURPHY Y LUGO (1986) cubren el 48% de la cobertura mundial de los bosques tropicales. Los primeros han llamado la atención a una gran cantidad de investigadores y agencias de conservación por lo que el conocimiento sobre diversos temas

es amplio (GEIST Y LAMBIN, 2001; 2002; SÁNCHEZ ET AL., 2005 a y b). En contraste, los BTSC son prácticamente inéditos en diversos temas tales como los estudios principalmente sinecológicos (GENTRY, 1988), con algunas excepciones limitadas a sitios específicos (DURÁN, 2004). De manera muy especial destaca la carencia de estudios de las comunidades vegetales que incluyan aspectos de la caracterización de la composición y la estructura; de la dinámica espacial y temporal, de la nomenclatura o sintaxonomía y del arreglo de las comunidades a lo largo de catenas.

Los BTSC albergan una proporción similar del banco genético mundial a la que contienen los bosques tropicales húmedos perennifolios (GENTRY, 1982; 1988; Janzen, 1988); y son fundamentales por proveer de múltiples bienes y servicios ambientales (COSTANZA ET AL., 1997). Datos recientes estiman que cerca del 80% de la superficie original de los BTSC se encuentra en un alto grado de perturbación (HOUGHTON ET AL., 1991; SÁNCHEZ ET AL., 2005 a y b). Los BTSC, a diferencia de los BTHP, no han sido utilizados en aspectos de manejo forestal y su principal uso se conduce hacia su total transformación en áreas de pastoreo en donde hay carencia de agua, o en zonas de cultivo intensivo en donde el agua no es limitante dado que los suelos que conforman el sustrato son en general de alta vocación agrícola (SÁNCHEZ ET AL., 2005). Ambas formas de uso, no obstante, han probado ser de bajos rendimientos en el corto plazo y de drásticas consecuencias ambientales en el largo plazo (LAMBIN ET AL., 1997; FAO, 2002). No obstante, gran número de especies vegetales han sido, son y seguirán siendo utilizadas como plantas con propiedades medicinales, cualidades que a pesar de conocerse empíricamente, casi no son mencionadas en las contadas publicaciones de corte florístico y menos aún se ha pensado en un aprovechamiento comercial.

Estudios de corte geobotánico y fitosociológico, en general, han probado ser fundamentales para elaborar estrategias de manejo, conservación y

restauración de comunidades (<http://ec.europa.eu/environment/nature/home.htm> y <http://www.schweizerbart.de/j/phytocoenologia>), lo que a su vez se refleja en mejores alternativas de calidad de vida para actores locales y por ende para amplios sectores sociales. Bajo el escenario anterior resulta prioritario llevar a cabo estudios de vegetación en BTSC que documenten aspectos sinecológicos en especial en países intertropicales como Brasil, Venezuela y México donde los BTCS aún son abundantes y paradójicamente confrontan las mayores tasas de pérdida (www.maweb.org/documents/document.290.aspx.pdf). A nivel mundial América Latina registra las mayores tasas de deforestación entre 1980 y 2000 (MILES ET AL., 2006). En México, por ejemplo, las tendencias de pérdida rebasan los promedios mundiales (TREJO, 2000). Esto es aún más relevante si los estudios derivan de áreas expuestas a diversos grados de influencia antrópica dado que esa realidad prevalece en todo su ámbito de distribución (SÁNCHEZ ET AL., 2005 a y b) a diferencia de lo que ocurre en áreas protegidas. Pero cabe mencionar que las superficies protegidas en áreas con BTCS sólo representan el 4% del total de la superficie de áreas protegidas de México (MAS & PÉREZ, 2005), aún cuando este tipo de vegetación ocupa el segundo lugar junto con el Bosque Tropical Subcaducifolio en cuanto a superficie a nivel nacional (PALACIO ET AL., 2000). Es por ello que se considera importante y prioritario realizar estudios de tipo fitosociológico en los BTSC, ya que es una cubierta vegetal en donde no se han creado áreas protegidas que resulten representativas y, por el contrario, sí ha sufrido pérdidas de cobertura de forma alarmante en las últimas décadas. Antecedentes de trabajos elaborados a través de métodos fitosociológicos en BTSC son muy recientes, destacan los realizados en Bolivia y Brasil, donde el método fitosociológico ha sido de gran utilidad (KESSLER Y BACH, 1999; BACH ET AL., 1999; HERNÁNDEZ-TORO, 2003). En otros países de gran diversidad donde abunda el ecosistema de bosque tropical seco caducifolio se tiene un buen número de trabajos de corte fitosociológico en Colombia (bosques secos Interandinos);

Brasil (Caatinga) y Venezuela (bosques costeros). La mayoría de estos estudios no han sido publicados en revistas de circulación internacional pero denotan la aplicabilidad del método y su alcance a corto y mediano plazos.

El presente trabajo se centra en determinar las asociaciones del BTSC, identificando los atributos que mejor explican los patrones de distribución catenal en dichas asociaciones, dando mayor énfasis a los atributos del relieve, para finalmente llevar a cabo una caracterización de la fisonomía, composición florística y ambiental de las asociaciones presentes en BTSC de la zona de estudio.

Cabe aclarar que los trabajos de vegetación para la zona de estudio son inexistentes, a pesar de que el área alberga una fitodiversidad extraordinaria por lo que se ha reconocido como un refugio de un gran número de especies endémicas, donde se estima que 7 de cada 10 son oriundas de México (MIRANDA, 1947; RZEDOWSKI, 1978 y 1991).

METODOLOGÍA

Adquisición de la información de la vegetación

El presente trabajo se llevó a cabo a través del método fitosociológico, utilizando como unidades de muestreo el levantamientos de relevés, elaborados en trabajo de campo durante un periodo de 2 años (abril 2004-octubre 2005) y en sitios donde las condiciones ecológicas se aprecian claramente y las cuales coinciden con agrupaciones de plantas que representan un tipo de vegetación particular (WERGER, 1974; KENT & COKER, 1992).

Diseño del muestreo y tamaño de la muestra

Para la selección de los relevés se llevó a cabo un trabajo previo en gabinete, a través de la utilización de un sistema de información geográfica en el cual se sobrepusieron cuatro capas de información: 1. Geología (GARDUÑO ET AL., 1999), 2. Geomorfología (ORTIZ, 2000), 3. Vegetación (INEGI, 1980) y 4. Una imagen SPOT (10m resolución). Estos insumos permitieron identificar la homogeneidad o heterogeneidad del paisaje en la zona de estudio para garantizar un levantamiento equitativo del número de relevés entre los diferentes escenarios del paisaje; localizando la vegetación mejor conservada y tomando en cuenta la cercanía a vías de acceso.

El tamaño de los sitios de muestreo fue determinado en función de tres criterios 1. Siguiendo las superficies determinadas por MUELLER-DOMBOIS & ELLENBERG (1974) que establecen entre 200 y 500 m² para zonas con estrato arbóreo; sobre todo si no se consideran árboles de gran porte (KESSLER, M. datos no publicados) 2. Tomando en cuenta que las superficies de las laderas escarpadas en la zona de estudio son de dimensiones pequeñas y fuertemente disectadas, por lo cual no es posible llevar a cabo relevés con superficies mayores a 400 m², pues acarrearía compilación de información en otros tipos de comunidad vegetal.

LEVANTAMIENTO FLORÍSTICO

Se obtuvo la información de los individuos de altura $\geq 3\text{m}$, recopilando la altura máxima del estrato arbóreo y el porcentaje de cobertura por especie, éste último obtenido visualmente (BRAUN-BLANQUET, 1979). La colecta de las especies vegetales en los sitios de muestreo fue únicamente del estrato arbustivo y arbóreo $\geq 3\text{m}$, ya que el prolongado periodo de estiaje predominante en la zona, somete al estrato arbustivo joven y en especial al

estrato herbáceo, a una presencia anual, siendo evidentes sólo en la temporada de lluvias, por lo que su identificación requería un periodo de estudio más largo. Todos los individuos de los tamaños antes mencionados fueron censados y determinadas las especies para cada uno de los cuadrantes. Las colectas florísticas fueron identificadas y/o cotejadas a través de la experiencia en campo, uso de los nombres comunes, consulta a herbarios en línea y por último la visita del herbario de Instituto de Ecología, A.C. en Pátzcuaro (IEB) en el estado de Michoacán para la determinación final y donde fueron depositadas en el acervo del herbario.

Levantamiento físico

Durante el trabajo de campo, además de la información de los levantamientos florísticos de los relevés, también se obtuvieron levantamientos físicos donde se recogieron datos de los atributos del relieve para cada relevé como: coordenadas (GPS); altitud (GPS, altímetro, mapa topográfico); litología (mapa geológico GARDUÑO ET AL., 1999 y identificación en campo); curvatura en planta; pendiente; exposición; posición de ladera; profundidad y textura del suelo, esta última a través de la identificación en campo de las clases texturales determinadas al tacto (SCHLICHITING ET AL., 1995; SIEBE ET AL., 1996). Los perfiles de suelos fueron llevados a cabo excavando pozos de 50cms x 50cms, ubicados en sitios que mostraron las características más representativas (curvatura en planta, pendiente y evitando senderos) para cada relevé (metodología adecuada según SIEBE, comunicación personal).

Otros atributos considerados fueron los de tipo antrópico como: el uso del suelo y el estado de conservación de la vegetación.

Análisis tabular y estadístico de la vegetación

1. DETERMINACIÓN DE ESPECIES CARACTERÍSTICAS O DIAGNÓSTICAS, ACOMPAÑANTES E INDIFERENTES.

Se les llama especies fieles o especies características a la agrupación de plantas que se encuentran estrechamente ligadas y que manifiestan su óptimo de presencia en determinadas comunidades vegetales (BRAUN BLANQUET, 1979). Para la obtención de las especies características se elaboraron tablas, donde se colocaron las especies (renglones) y relevés (columnas), con sus respectivos porcentajes de cobertura agrupados en rangos. Para determinar los rangos, se utilizó el método de Braun Blanquet modificado en función de los resultados obtenidos con base en el histograma de frecuencia de los porcentajes de cobertura de las especies en el BTSC.

Los rangos de cobertura fueron modificados, ya que en ambientes templados la frecuencia de las especies es alta y la diversidad es baja, lo cual da como resultado una representación importante de las especies en los rangos altos del porcentaje de cobertura, condición totalmente inversa en BTSC, donde existe una gran diversidad de especies pero con un número de frecuencia bajo. En un BTSC conservado es difícil encontrar que una sola especie arbórea cubra más del 60% de un área muestreada.

El método fitosociológico está interesado en definir rangos de comportamiento (expresados por el porcentaje de cobertura vegetal) de las especies en grupos de relevés distribuidos a lo largo de gradientes o catenas. Es más importante la cantidad de relevés que la evaluación precisa del porcentaje de cobertura en la definición de las asociaciones. Una vez definidas estas últimas, son interpretadas como agregados de especies con comportamientos similares en respuesta a condiciones ambientales similares, denotando homogeneidad interna dentro de un contexto regional.

La determinación de las especies características se obtuvo del resultado de la media de la frecuencia que fue la suma del porcentaje de cobertura para cada especie entre el número de veces que apareció dicha especie en el total de los relevés. El establecimiento de un rango en la media de la frecuencia permitió identificar las especies características, y excluir especies con frecuencias muy altas (acompañantes) y muy bajas (raras).

2. DETERMINACIÓN DE ASOCIACIONES VEGETALES

Una vez obtenidas las especies características, el siguiente análisis se realizó a través de la comparación tabular donde se separaron grupos de especies que muestran una distribución similar entre el total de los muestreos de los relevés, considerando además su óptimo de vitalidad (grados de cobertura).

Para ello utilizamos un análisis de cúmulos, a través del método TWINSpan en el programa PC-ORD, este es un método de clasificación divisivo (HILL, 1979). Dicho método agrupa especies que comparten condiciones ambientales similares. Los resultados en TWINSpan, permiten observar si la vegetación presenta patrones de agrupación. Las especies que conforman los diferentes grupos se les llama especies diagnósticas, y éstas establecen una interrelación ecológica precisa.

Las especies diagnósticas son usadas para organizar a las comunidades en una clasificación en la cual la asociación es la unidad básica (KENT & COKER, 1992). En el presente estudio trabajamos sólo con un tipo de comunidad vegetal (BTSC), lo que nos permitió alcanzar el nivel de asociación vegetal, en el momento de determinar grupos de especies que compartían los mismos relevés.

Las especies que no se agruparon en las asociaciones resultado del análisis de TWINSpan, se colocaron al final de la tabla. Estas son especies constantes en todos los relevés o extrañas que no permiten deducir que su presencia responda a una condicionante ambiental. Las especies constantes son especies presentes en un alto porcentaje de los relevés (más del 60%). Las especies de constancia baja, con menos de 10%, son llamadas especies raras o extrañas.

3. IDENTIFICACIÓN DE LOS ATRIBUTOS QUE INFLUYEN EN LA DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN (ANÁLISIS ESTADÍSTICO)

Se realizaron análisis estadísticos para determinar los atributos del relieve que influyen en la distribución de la vegetación. Dichos análisis fueron el Análisis Canónico Discriminante (ACD), Correspondencia Canónica (ACC) y prueba de Monte Carlo llevados a cabo dentro del programa PC-ORD (McCune & Mefford 1995).

El ACD es un análisis estadístico indirecto (sin variables ambientales), que permite analizar la correlación entre especies y relevés. Este análisis permite obtener grupos de especies pertenecientes a grupos de relevés diferentes a otros, lo importante de este análisis es acceder para realizar las primeras hipótesis acerca de los factores ambientales que puedan estar determinando estas similitudes o disimilitudes.

Posteriormente se llevó a cabo un Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) (Ter Braak, 1986), que es un análisis de gradiente directo (inserción de variables ambientales), este análisis permite ver escenarios y seleccionar las variables de los atributos del relieve que presentan una mayor correlación con la vegetación. Este análisis estadístico detecta la mejor combinación entre variables ambientales para explicar los patrones de la vegetación para los sitios de muestreo (Jongman et al., 1995).

El ACC llevado a cabo con correlaciones inter-conjunto y valores de diagrama de dispersión fueron usados para identificar los ejes y variables ambientales que influyen en la distribución de la vegetación en la zona de estudio.

El ACC al mismo tiempo permitió ver la correlación entre variables y establecer cuales eran covariables, por lo que es aconsejable su exclusión del análisis, ya que pueden incorporar ruido estadístico, debido a que algunos análisis se basan en el supuesto de la independencia de las variables. Sin embargo esto no significa que dichas covariables no tengan una participación importante en la distribución de la vegetación, sino que están ligadas a otras, a través de los procesos ambientales.

Los atributos del relieve considerados fueron: altitud, litología, curvatura en planta (laderas: cóncavas, rectas y convexas), pendiente, geoforma (ladera: superior, media y baja) y exposición, para este último atributo se buscaron relevés con exposición norte o sur, porque la diferencia de horas de radiación entre ambas laderas es significativa en latitudes al norte del ecuador y en zonas de montaña. Por otro lado también se consideraron variables del suelo como: la profundidad y clases texturales. Y finalmente un tercer tipo de variables fueron recopiladas, relacionadas con la perturbación antrópica, teniendo así, el uso del suelo y el estado de la vegetación (natural y perturbado: bajo, medio y alto).

Se llevó a cabo una prueba de Monte Carlo en CCA, con una hipótesis nula de no relación entre matrices y con 99 permutaciones. Esta prueba evaluó la significancia del eigenvalue a lo largo de los ejes de ordenación usando CCA.

Los resultados obtenidos del análisis de CCA fueron comparados con pruebas de χ^2 y G para comprobar entre valores observados y esperados.

4. DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FISONÓMICAS, FLORÍSTICAS Y AMBIENTALES DE LAS ASOCIACIONES

El siguiente apartado corresponde a la representación fisonómica y florística de las asociaciones junto con la descripción de las condiciones ambientales de las mismas, tomando en cuenta las especies indicadoras y diagnósticas expuestas en la tabla de fidelidad, así como también la descripción de las características climáticas para cada una de las asociaciones.

Los resultados fueron basados en la información de las tablas de fidelidad, esta última se entiende como la limitación más o menos estrecha de determinadas especies a unas comunidades o asociaciones vegetales específicas (BRAUN BLANQUET, 1979). Las tablas de fidelidad muestran la importancia de cada especie dentro de la asociación, esto es, determinando el grado de presencia y vitalidad de cada especie en relación a la asociación a la cual pertenece y en la relación a las otras asociaciones. La obtención de los grados de presencia y vitalidad de las especies permiten obtener los grados de fidelidad. Dichos grados están representados por 5 niveles, el grado más alto de fidelidad es para las especies exclusivas (V), siguen las selectivas (IV), preferentes (III), indiferentes (II) y extrañas (I) (Ver BRAUN BLANQUET, 1979). El grado de presencia de una especie se obtiene dividiendo el número de relevés en que aparece entre el número total de relevés de la asociación, teniendo cinco grados de presencia: I = 0-20%, II = 21-40%, III = 41-60%, IV = 61- 80 y V = 81-100%. Por su parte la vitalidad es la suma de los valores del porcentaje de cobertura entre el número total de relevés de la asociación.

Se les llama especies exclusivas, a aquellas que se presentan sólo en la asociación a la que pertenecen y tienen el grado más alto de fidelidad; selectivas a las especies que tienen un alto grado de fidelidad a la comunidad, pero también se presentan en otras, aunque en éstas últimas

son poco abundantes y raras o presentan vitalidad disminuida. Se denomina especies preferentes, a las más o menos abundantes en varias comunidades pero que tienen preferencia por una en particular y lo muestran en óptima presencia.

RESULTADOS

La sobreposición de las cuatro capas de información para seleccionar los sitios de muestreo, permitió identificar 10 diferentes ambientes, donde el BTSC se estableció. Teniendo cinco tipos de litología: granitos, esquistos, brechas volcánicas, tobas ácidas y andesitas, sobre todas las rocas se establecen laderas con moderada y fuerte pendiente. Los esfuerzos para la adquisición de la información se encaminaron a cubrir el levantamiento de relevés en los diferentes ambientes. La composición a color de la imagen SPOT, permitió seleccionar vegetación más conservada.

Se llevó a cabo el levantamiento de 37 relevés representados en todos los casos por BTSC, con una superficie de 20 m x 20 m (400 m²), sin excepción localizados en zonas de laderas, pues en las formas del relieve de piedemonte, terrazas y planicies aluviales, el establecimiento de áreas agrícolas desplazó totalmente a la vegetación original.

Análisis tabular y estadístico de la vegetación

1. DETERMINACIÓN DE ESPECIES CARACTERÍSTICAS O DIAGNÓSTICAS (ANÁLISIS TABULAR)

La determinación de las especies características o diagnósticas se llevó a cabo, tomando en cuenta el rango de la media de la frecuencia entre 1.5 y 4.0, ya que en este rango se concentraron la mayor parte de las especies, quedando fuera especies que no tuvieron una correlación positiva marcada respecto a la comunidad (especies constantes y raras). El total de las especies inicialmente era de 80, pero al seleccionar las especies características, sólo permanecieron 41 (ver en anexo las tablas 1 y 2 así como el listado florístico, Salazar, 2008).

La modificación de los rangos de cobertura de la vegetación a través de un histograma de frecuencia, dio como resultado lo siguientes niveles: 1= < 5%; 2 = 6%-10%; 3= 11%-20%; 4= 21%- 40% y 5= >41%.

2. DETERMINACIÓN DE ASOCIACIONES VEGETALES (ANÁLISIS ESTADÍSTICO)

El análisis en TWINSpan arrojó como resultado cuatro asociaciones en tres niveles de corte. La primera división definió a la asociación con las siguientes especies indicadoras: *Caesalpinia platyloba* S.Watson -*Caesalpinia eriostachys* Benth con un valor de eigenvalue de 0.501 y representada con ocho relevés; en un segundo nivel quedó separada la asociación *Bauhinia divaricata* L. - *Luehea candida* Willd. con 0.471 eigenvalue y representada con 18 relevés y finalmente en un tercer nivel se diferenciaron las

asociaciones *Amphipterygium adstringens* (Schltdl) Standl. - *Randia laevigata* Standl. y *Lysiloma acapulcense* (Kunth) Benth. - *Dalbergia granadillo* Pittier con un eigenvalue de 0.592, representadas con ocho y tres relevés respectivamente (Fig. 1).

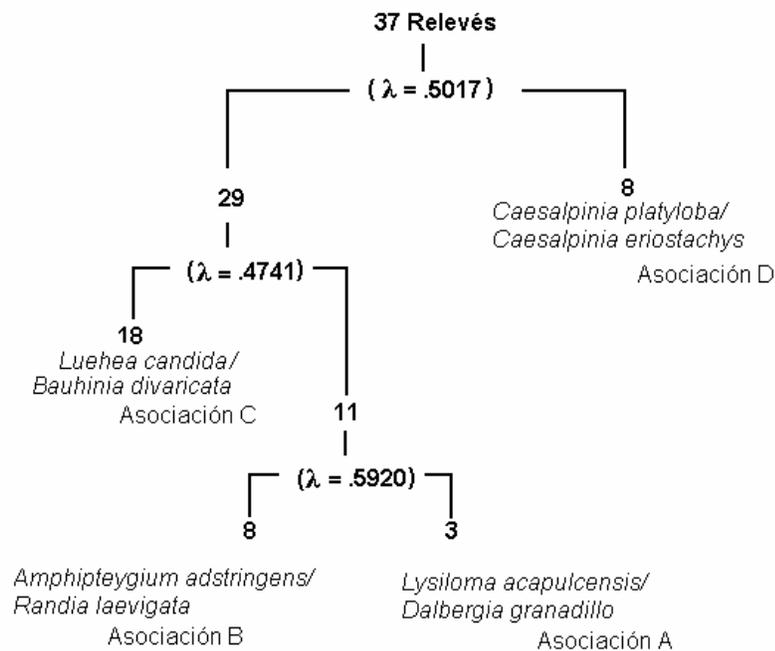


Figura 1 - Dendrograma resultado del análisis en TWINSpan (Análisis divisivo), los valores en los corchetes representan los valores de disimilitud. Se distinguieron cuatro asociaciones.

Las cuatro asociaciones presentaron 6, 5, 5 y 8 especies diagnósticas en cada grupo de asociación (Tabla 2). Las especies diagnósticas para la asociación A fueron *Lysiloma acapulcense* (Kunth) Benth. (Lysaca), *Dalbergia granadillo* Pittier (Dalgra), *Coccoloba venosa* L. (Cocven), *Bursera simaruba* (L.) (Bursim), *Heliocarpus occidentales* Rose (Helocc) y *Coccoloba barbadensis* Jacq. (Cocbar) (Tabla 1).

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

La asociación B con *Lonchocarpus Hintonii* Sandwith. (Lonhin), *Randia laevigata* Standl. (Ranlae), *Bursera heteresthes* Bullock (Burhet), *Amphipterygium adstringens* (Schltdl) Standl. (Ampads) y *Lonchocarpus eriocarinalis* Micheli. (Loneri), (Tabla 2). La asociación C fue *Luehea candida* Willd. (Luecan), *Cochlospermum vitifolium* (Wild.) Spreng. (Cocvit), *Bauhinia divaricata* L. (Baudiv), *Lonchocarpus caudatus* Pittier (Loncau) y *Ceiba aesculifolia* (kunth.) Britten & Baker f. (Ceiaes) y (Tabla 1).

Por último la asociación D con *Caesalpinia platyloba* S. Watson (Caepia), *Erythroxylum rotundifolia* Lunan (Eryrot), *Caesalpinia eriostachys* Benth. (Caeri), *Acacia houghii* (Britton & Rose) (Acahou), *Bursera Coyucensis* Bullock (Burcoy), *Manihot tomatophylla* Standl. (Mantom), *Erythroxylum mexicanum* Kunth (Erymex) y *Gossypium aridum* (Gosari) (Rose & Standl. Ex. Rose) Skovst (Tabla 1).

Tabla 1 - Resultado del análisis de cúmulos mostrando la afinidad florística (TWINSPAN PCORD), determinando cuatro asociaciones en BTSC a partir de las especies características o diagnósticas. Las asociaciones aparecen colocadas en orden decreciente en relación a la altitud, asociación A (> 930 m.s.n.m.), B (350-790 m.s.n.m.), C (350-790 m.s.n.m.) y D (< 400 m.s.n.m.). N. D.* Especie no determinada. Los números corresponde a los rangos del porcentaje de cobertura 1= < 5%; 2 = 6%-10%; 3= 11%-20%; 4= 21%- 40% y 5= >41%. Las especies acompañantes y accidentales aparecen en anexo (Tabla 2).

ASOCIACIÓN	RELEVÉS																																								
		ASOC. A					ASOCIACIÓN B										ASOCIACIÓN C															ASOCIACIÓN D									
ESPECIE DIAGNOSTICAS	CLAVE	20	21	22	26	27	28	29	33	34	35	36	37	12	13	14	17	18	19	23	24	25	1	2	3	15	16	30	31	32	4	5	6	7	8	9	10	11			
<i>Coccoloba barbadensis</i> Jacq.	Cocbar	3											1	1																											
<i>Heliocarpus occidentalis</i> Rose	Helocc	1	1																										2												
<i>Lysiloma acapulcense</i> (Kunth) Benth.	Lysaca	2	3																																						
<i>Dalbergia granadillo</i> Pittier	Dalgra		2	3																																					
<i>Bursera simaruba</i> (L.)	Bursim	3	2					1				1	1																												
<i>Coccoloba venosa</i> L.	Cocven	3	2													2																									
<i>Lonchocarpus eriocarinalis</i> Micheli	Loneri									4																													1		
<i>Amphipterygium adstringens</i> (Schltd.) Standl.	Ampads				4	4							4	1									1		1																
<i>Randia laevigata</i> Standl.	Ranlae				1				2	3	2	5	4			1	1			1					1								2	2	2						
<i>Bursera heteresthes</i> Bullock	Burhet	4	1				1	4	1	4	4	2										2																			
<i>Lonchocarpus hintonii</i> Sandwith	Lonhin		2	1	4	1			4	4	3	3															1	4	1												1
<i>Bauhinia divaricata</i> L.	Baudiv													1	3											4	1	1													1
<i>Ceiba aesculifolia</i> (Kunth.) Britten & Baker f.	Ceiaes	1						2			1											1	1		3			4							1						
<i>Lonchocarpus caudatus</i> Pittier	Loncau			1			2	1							3						4				2														1		
<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd.) Spreng	Cocvit		1				4			2				1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	3				3	1	1											
<i>Luehea candida</i> Willd.	Luecan	1			1					1				3	4	2	4	2	1	2	4	3				3	1	2	3	1											
<i>Gossypium aridum</i> (Rose & Standl. Ex Rose) Skovst.	Gosari																																						2	2	
<i>Manihot tomatophylla</i> Standl.	Mantom																																						1		2
<i>Acacia houghii</i> (Britton & Rose)	Acahou																																						1	2	1
<i>Erythroxylon mexicanum</i> Kunth	Erymex																							1	1														1	1	
<i>Caesalpinia eriostachys</i> Benth.	Caeri													1	3																								2	3	1
<i>Caesalpinia platyloba</i> S. Watson	Caepia						1																																1	1	2
<i>Erythroxylon rotundifolia</i> Lunan	Eryrot										1						1	2	4	2								1											1	1	2
<i>Bursera coyucensis</i> Bullock	Burcoy	1	1																				1																2	2	1

3. IDENTIFICACIÓN DE LOS ATRIBUTOS QUE INFLUYEN EN LA DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN (ANÁLISIS ESTADÍSTICO)

Para llevar a cabo el análisis de ACD se realizaron comparaciones entre los resultados de los eigenvalues, para diferentes números de segmentos teniendo un mejor resultado en 14 segmentos con eigenvalues en el eje 1 = 0.603, eje 2 = 0.419 y eje 3 = 0.319 con 15, 11 y 15 interacciones respectivamente.

La varianza explicativa resultó de 53%, 29% y 17% para los ejes 1, 2 y 3 respectivamente.

El gráfico del análisis en ACD permitió observar que las asociaciones A y D respondían en un eje de forma opuesta y en el otro eje sucedía lo mismo con las asociaciones B y C (Fig. 2).

Esto permite realizar hipótesis acerca de las asociaciones A y D, las cuales están influenciadas por valores contrastantes en alguno de los atributos ambientales, lo mismo sucede con B y C (Fig. 2). No obstante B y C se sobreponen en el eje 1.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

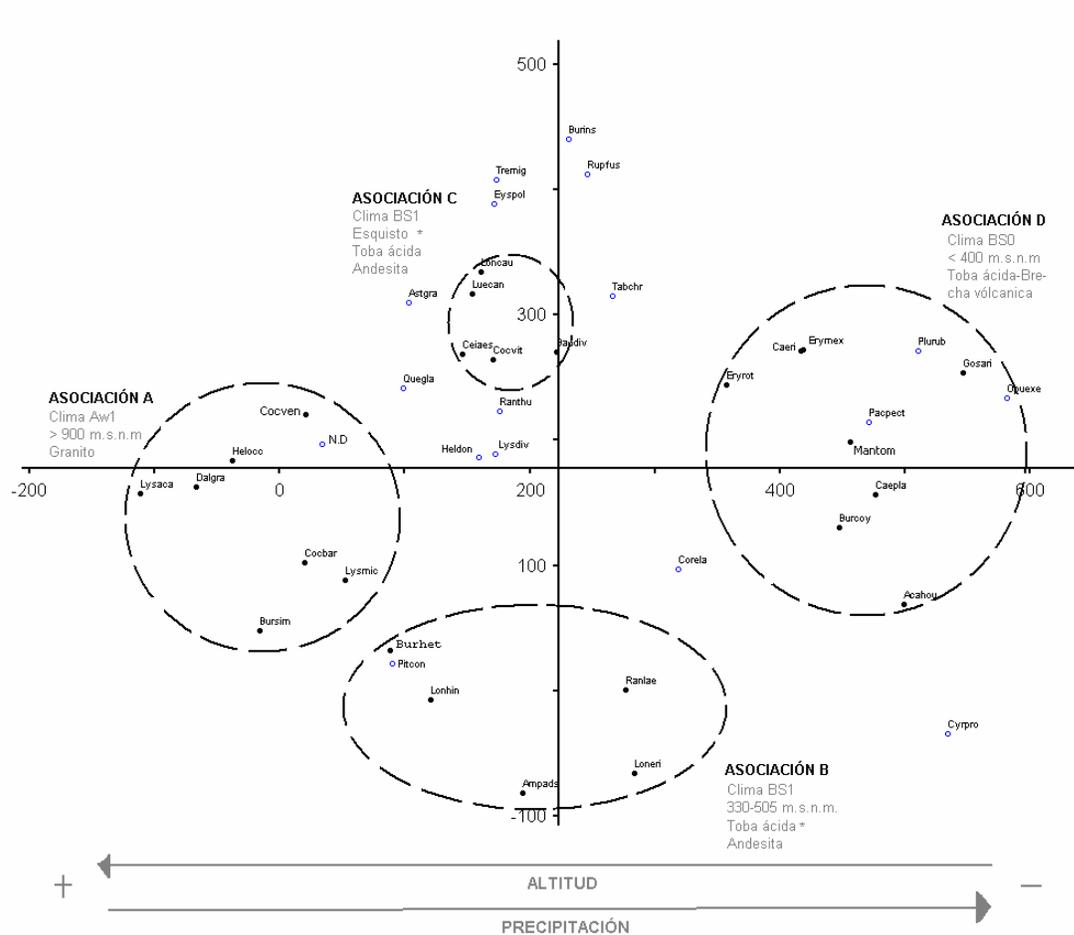


Figura 2 - Gráfica resultado del Análisis Canónico Discriminante, en la cual se muestra que la separabilidad de las cuatro asociaciones es clara (círculos en línea punteada). Ver tabla 1 para los nombres de las asociaciones. Los círculos negros corresponde a las especies diagnosticas, y los círculos azules corresponden a especies accidentales, acompañantes y/o indiferentes. La información en color gris muestra algunas de las características ambientales de las respectivas asociaciones y permite realizar hipótesis acerca de la zona de estudio.

Posteriormente se llevó a cabo el análisis en ACC y para poder realizarlo, los datos se agruparon de la siguiente forma: los atributos de altitud, pendiente y profundidad del suelo fueron variables continuas mientras que los datos de geoforma, forma en planta, exposición, clases texturales de suelo, uso del suelo y estado de la vegetación fueron variables cualitativas donde se les

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

determinó una importancia jerárquica (Tabla 2). La geología también fue una variable cualitativa de tipo “dummy”.

Tabla 2 - Variables ambientales representadas de forma cualitativa. La numeración corresponde a un valor jerárquico. *El número mayor corresponde a una mayor concentración de humedad, ** el número mayor corresponde a mayor cantidad de radiación, ***el número mayor corresponde a un mayor porcentaje de arena y **** el número mayor corresponde a mayor perturbación. Las clases texturales fueron agrupadas con base en el contenido del porcentaje de arena.

VARIABLE CUALITATIVA	CATEGORIAS JERÁRQUICAS			
Geoforma: *	1. ladera superior	2. ladera media	3. ladera baja	
Forma en planta *	1. convexa	2. recta	3. cóncava	
Exposición **	1. norte	2.este y oeste	3. sur	
Clase textura (% de arena)***	1. 0-30% (franco arcillo limosa, franco arcillosa y franco limosa)	2. 31-60% (arcillo-arenosa, franco arcillo-arenosa y franco arenosa)	3. 61-100% (arenosa franca y arenosa)	
Uso del suelo ****	1. forestal	2. forestal y ganadero		
Grado de perturbación ****	1. natural	2. perturbado bajo	3.perturbado moderado	4.perturbado alto

En el resultado del análisis de ACC entre variables (15 variables en total) las covariables eliminadas fueron pendiente y clases texturales. La eliminación de covariables no demerita la importancia que puedan ejercer en la distribución de las especies vegetales del BTSC, sino que su presencia está ligada a otra variable, ejemplo de ello fue la variable clase textural, la cual mostró un coeficiente de correlación positiva con el tipo de roca, para la clase franco-arenosa y el granito; así como también entre las clases

texturales franco-limosas y franco-arcillo-limosas y el esquisto. Mientras que la variable de pendiente estuvo fuertemente correlacionada con la altitud.

Para los casos de las clases texturales es importante destacar que juegan un papel importante en la retención de humedad en el suelo, lo que consecuentemente conlleva a una diferenciación en la composición florística de la vegetación.

Los resultados de la correlación inter variables en ACC, determinaron que los atributos del relieve, litología y suelos con mayor correlación con la distribución de la vegetación fueron: tipo de litología, altitud y profundidad del suelo. El resto de las variables no tuvieron correlaciones importantes, por lo que se eliminaron y se volvió a correr el análisis, obteniendo los siguientes resultados de correlación: litología; toba ácida-brecha volcánica -0.937, granito -0.680, esquisto 0.770; altitud 0.635 y profundidad del suelo 0.558 (Tabla 3). Los datos de toba ácida, no aparecen porque se eliminaron, ya que los datos de las rocas son datos dummy, y una de ellas por lógica es predecible a partir de las otras.

El resultado de la gráfica en ACC es similar a ACD donde las asociaciones se presentan en los extremos de los ejes de la mayoría de las variables (Fig. 4). Por ejemplo las asociaciones A y D se establecen en rangos altitudinales muy diferentes, la primera en altitudes superiores a 950 m.s.n.m.m mientras la asociación D se localiza en rangos menores 400 m.s.n.m.m. La asociación A se encuentra en rocas graníticas y la asociación D sobre toba ácida-brechas volcánicas.

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

Tabla 3 - Valores de correlación significativa obtenidos a través del análisis de CCA. (BRAAK.,1986). Aquí no presentó correlación significativa andesita.

VARIABLES	EJE 1	EJE 2	EJE 3
ALTITUD	0.643	-0.355	-0.598
LITOLOGÍA			
Toba ácida- Brecha volcánica	-0.936	-0.292	-0.087
Esquisto	0.232	0.750	-0.412
Granito	0.436	-0.729	-0.424
PROPIEDADES DEL SUELO			
profundidad del suelo	0.561	-0.304	0.098

La profundidad de los suelos también fue opuesto, pues la asociación A mostró los mayores valores, mientras para la asociación D fue inverso. El mayor espesor del suelo es común de suelos sobre rocas graníticas, como se manifestó en la asociación A.

La profundidad de los suelos en la asociación D no sobrepasa los 32 cms, mientras en la asociación A son mayores de 50 cms y alcanzan hasta 70 cms. El porcentaje de arena en la asociación D presenta porcentajes menores 30% en casi el 70 % de los sitios muestreados, mientras en A todos los sitios presentan más de 80 % de arena en los suelos.

El análisis en ACC muestra que la altitud no permitió una diferenciación entre las asociaciones B y C (Fig. 3), ya que ambas ocupan casi el mismo rango altitudinal entre 350 hasta 790 m.s.n.m. Sin embargo, la litología separó ambas asociaciones, debido a que la asociación B se establece principalmente sobre tobas ácidas y en menor medida sobre andesitas. Dichas rocas presentan importante porcentaje de arena en los suelos. A

diferencia de B, la asociación C se establece en tres tipos de rocas: principalmente en esquistos y en menor medida en toba ácida y andesitas. Y son precisamente los esquistos que presentaron menor porcentaje de arena y mayor de arcilla.

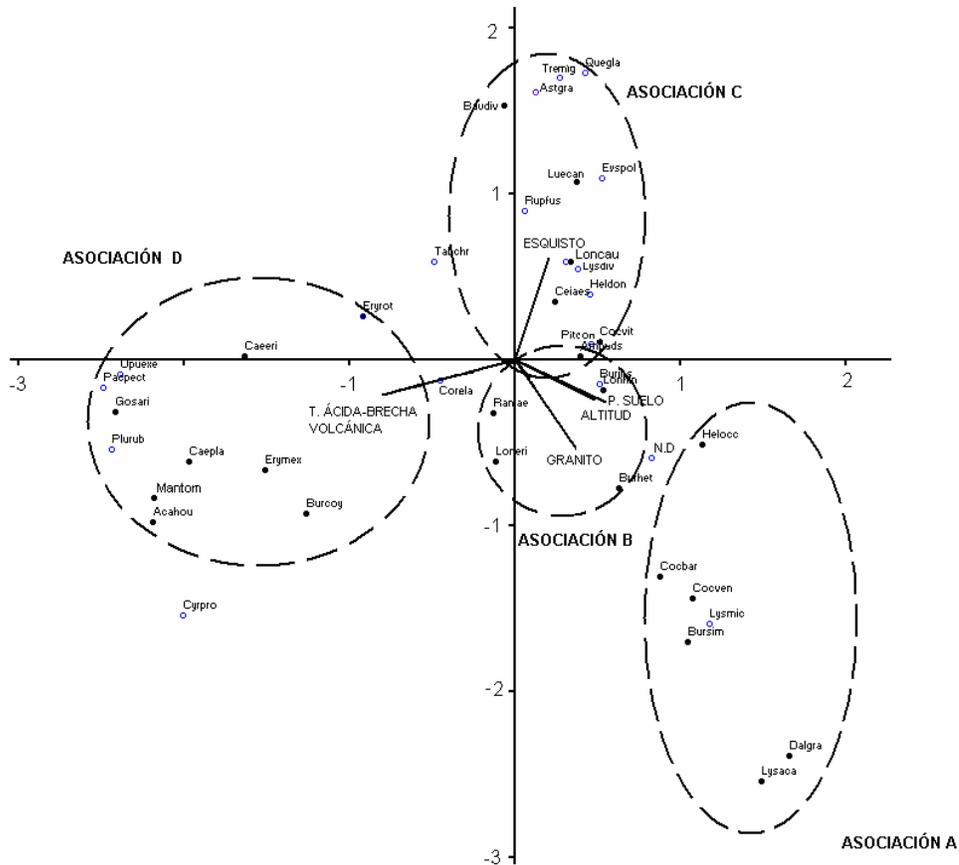


Figura 3 - Diagrama de ordenamiento derivado del Análisis de Correspondencia Canónico, mostrando la correlación entre las variables ambientales y las asociaciones vegetales en la zona de estudio.

El 80% de los sitios de la asociación B presenta valores igual o mayores a 60% de arena mientras el 70% de los sitios de la asociación C presenta menos del 65 % de arena en los suelos.

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

La variable profundidad del suelo no permitió una separación entre las asociaciones B y C, porque ambas presentan profundidades desde 2 hasta 60 cms.

La correlación entre las variables fue importante granito y altitud con 0.712, esto es comprensible pues la localización de las rocas granitas se ubicaba en las porciones medias y altas de la microcuenca (>580 m.s.n.m.). El resto de las variables muestran valores bajos de correlación ya que se eliminaron las covariables.

Los resultados obtenidos a través de la prueba de Monte Carlo mostraron que a 99 permutaciones la significancia en el eje 1 fue de 0.547 y en el eje 2 de 0.397 con una $p = .01$.

Tabla 4 - Coeficiente de correlación entre variables, donde el único valor alto aparece en negritas.

CORRELACIÓN PONDERADA ENTRE VARIABLES EN LA MATRIZ SECUNDARIA							
	altitud	granito	esquistos	B. Volcánica	andesita	pendiente	P. suelo
altitud	1						
granito	0.712	1					
esquistos	0.118	-0.278	1				
toba acida-brecha volcánica	-0.425	-0.193	-0.337	1			
andesita	-0.227	-0.18	-0.315	-0.218	1		
profundidad del suelo	0.399	0.298	0.036	-0.345	0.154	0.143	1

Para llevar a cabo las pruebas de χ^2 y G se agruparon los valores de las variables ambientales para las cuatro asociaciones (A, B, C y D) quedando la información como muestra la tabla 5.

Tabla 5 - Agrupación de los valores de las variables con correlación significativa en CCA excepto litología por ser una variable cualitativa.

VARIABLES RELIEVE-SUELO	CATEGORÍAS Y CODIFICACIÓN			
Altitud	I. 280-400 m.s.n.m	II. 401-800 m.s.n.m..m.	III. > 800 m.s.n.m. m.	
Profundidad del suelo	I. < 10 cms	II. 10- 35 cms	III. 35 – 50 cms	IV. > 50 cms

Las pruebas estadísticas de Chi² y de G confirmaron los resultados obtenidos en el análisis en ACC, en donde las variables de altitud, litología, profundidad del suelo tienen una influencia significativa sobre la distribución de las cuatro asociaciones de vegetación ($p = 0.05$).

Con respecto a la variable de exposición, dichas pruebas no mostraron significancia, lo que expone que la distribución de la vegetación (arbustiva y arbórea) en el BTSC en la zona de estudio, no depende de dicha variable. Sin embargo cabe mencionar que la observación en campo mostró una abundante presencia de lianas en las laderas con exposición al norte.

4. DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FISONÓMICAS, FLORÍSTICAS Y AMBIENTALES DE LAS ASOCIACIONES EN EL BTSC EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

Asociación A: *Lysiloma acapulcense* (Kunth) Benth. (Lysaca) y *Dalbergia granadillo* Pittier (Dalgra).

Relevé representativo: 21

Fisionomía: constituido por árboles homogéneos que *alcanzan hasta 20 m de altura*, se presentan manchones de árboles dominados por *Lysiloma acapulcensis* hasta con 20% de cobertura y con menor presencia *Dalbergia granadillo*, mientras *Bursera simaruba* y *Lonchocarpus hintonii* alcanzan hasta 10% de cobertura.

Composición florística: Las especies de la asociación A muestran casi todas altos grados de presencia (IV) y vitalidad (1.7). La composición florística de esta asociación presenta especies exclusivas siendo el caso de *Lysiloma acapulcensis* y *Dalbergia granadillo* (grado de fidelidad V), y las restantes como: *Heliocarpus occidentales*, *Bursera simaruba* y *Coccoloba venosa* son selectivas (IV) y *Coccoloba barbadensis* es una especie preferencial (III),

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

estas 4 últimas se presentan también aunque con muy baja presencia en la asociación B (*Amphipterygium adstringens*/*Randia laevigata*) y C (*Cochlospermum vitifolium* y *Bauhinia divaricata*). Por otro lado *Busera heteresthes* es una especie diagnóstica de B, sin embargo se presenta con importante presencia en esta asociación (Tabla 6).

Características ambientales: La Asociación de *Lysiloma acapulcensis* y *Dalbergia granadillo*, se localiza en altitudes >900 m.s.n.m.m.; se asienta sobre rocas graníticas, con suelos profundos > 50 cms, con porcentajes de arena >80 hasta 90%; en posiciones de ladera altas y formas de ladera principalmente recta; con pendientes mayores de 30°.

La asociación se ubica en un clima Aw₁(w)ig correspondiendo a un clima cálido, el más húmedo de los subhúmedos, isotermal (i) (oscilación menor 5°) y marcha de la temperatura tipo Ganges. Esta asociación de BTSC de la zona de estudio se presenta con un claro descenso de temperatura en comparación con las zonas en las que se establecen las otras asociaciones.

Asociación B: *Amphipterygium adstringens* (Schltdl) Standl. (Ampads) y *Randia laevigata* Standl.

Relevé representativo: 37

Fisonomía: Las especies de esta asociación están constituidas por árboles homogéneos que alcanzan hasta 16 m, los manchones de árboles tienen especies indicadoras y dominantes de *Amphipterygium adstringens* - *Randia laevigata* hasta con un 40% de cobertura y especies diagnósticas con menor presencia *Lonchocarpus hintonii* con un 20% de cobertura.

Composición florística: Esta asociación no tiene especies exclusivas, pero todas sus especies tienen una importante presencia, constituida principalmente por *Amphipterygium adstringens*, *Randia laevigata*, *Bursera heteresthes*, *Lonchocarpus hintonii* y *Lonchocarpus eriocarinalis*.

Los valores de fidelidad para las especies de la asociación B presentan un 60% con valores altos en el grado de presencia (IV) y vitalidad (hasta 2.1) (Tabla 6). Cabe destacar que B comparte especies con A en el mismo nivel de grado de presencia pero con valores más bajos de vitalidad (1.7). *Randia laevigata*, *Bursera heteresthes*, y *Lonchocarpus hintonii* son selectivas. Por último *Lonchocarpus eriocarinalis* y *Amphipterygium adstringens* corresponden a especies preferenciales (Tabla 6).

Características ambientales: La Asociación de *Amphipterygium adstringens*, *Randia laevigata*, se localiza en altitudes 330-505 m.s.n.m.m.; se asienta sobre rocas de toba ácida y andesita; presenta suelos entre 15-60 cms de profundidad, con porcentajes de arena >60 hasta 80% en tobas ácidas y 30%-80% de arena en roca andesíticas; predominaron laderas con una posición de laderas medias y bajas; con una forma de ladera principalmente recta; presentando pendientes entre 12 ° y 30°.

La asociación se ubica en un clima BS₁(h')w(w)(i)gw''; correspondiendo a un clima seco, con temperaturas anuales mayores a 22° C y el mes más frío mayor a 18° C; con precipitaciones 10 veces mayor la cantidad de lluvia del mes más húmedo de la mitad caliente del año que en el más seco; y en los casos de las letras (i') con poca oscilación; g marcha de la temperatura tipo Ganges y w'' presencia de canícula.

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

Tabla 6 - Muestra los datos de fidelidad de las cuatros asociaciones A, B, C y D. Los números romanos indican el grado de frecuencia o presencia de las especies con respecto a las diferentes asociaciones: I. 0-20%; II. 21-40%; III. 41-60%; IV. 61-80% y V. 81-100%; y los números arábigos la vitalidad de la vegetación (a mayor número mayor vitalidad).

ASOCIACIÓN		A	B	C	D
ESPECIE DIAGNÓSTICAS	CLAVE				
<i>Coccoloba barbadensis</i> Jacq.	Cocbar	II(1)	I(0.1)	I(0.06)	
<i>Heliocarpus occidentalis</i> Rose	Helocc	IV(0.7)		I(0.1)	
<i>Lysiloma acapulcense</i> (Kunth) Benth.	Lysaca	IV(1.7)			
<i>Dalbergia granadillo</i> Pittier	Dalgra	IV(1.7)			
<i>Bursera simaruba</i> (L.)	Bursim	IV(1.7)	II(0.3)		
<i>Coccoloba venosa</i> L.	Cocven	IV(1.7)		I(0.1)	
<i>Lonchocarpus eriocarinalis</i> Micheli	Loneri		I(0.7)		I(0.1)
<i>Amphipterygium adstringens</i> (Schltd.) Standl.	Ampads		II(1.3)	I(0.2)	
<i>Randia laevigata</i> Standl.	Ranlae		IV(1.9)	II(0.2)	II(0.7)
<i>Bursera heteresthes</i> Bullock	Burhet	IV(1.7)	IV(1.8)	I(0.1)	
<i>Lonchocarpus hintonii</i> Sandwith	Lonhin	IV(1)	IV(2.1)	I(0.3)	I(0.1)
<i>Bauhinia divaricata</i> L.	Baudiv			II(0.6)	I(0.1)
<i>Ceiba aesculifolia</i> (Kunth.) Britten & Baker f.	Ceiaes	II(0.3)	II(0.3)	II(0.5)	I(0.1)
<i>Lonchocarpus caudatus</i> Pittier	Loncau	II(0.3)	II(0.3)	II(0.6)	I(0.1)
<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Wild.) Spreng	Cocvit	II(0.3)	II(0.7)	IV(1.1)	
<i>Luehea candida</i> Willd.	Luecan	II(0.3)	II(0.2)	IV(2.0)	
<i>Gossypium aridum</i> (Rose & Standl. Ex Rose) Skovst.	Gosari				II(0.5)
<i>Manihot tomatophylla</i> Standl.	Mantom				III(0.7)
<i>Acacia houghii</i> (britton & Rose)	Achou				III(1.0)
<i>Erythroxylon mexicanum</i> Kunth	Erymex			I(0.1)	III(0.6)
<i>Caesalpinia eriostachys</i> Benth.	Caeri			I(0.2)	III(1.4)
<i>Caesalpinia platyloba</i> S. Watson	Caepa		I(0.1)		IV(1.0)
<i>Erythroxylon rotundifolia</i> Lunan	Eryrot		I(0.1)	II(0.6)	IV(1.0)
<i>Bursera coyucensis</i> Bullock	Burcoy	IV(0.7)		I(0.06)	III(0.9)
ESPECIES ACOMPAÑANTES					
<i>Eysenhardtia polystachya</i> (ortega.) Sarg.	Eyspol			II(0.4)	
<i>Heliocarpus donell-smithii</i> Rose	Heldon		III(0.7)	I(0.3)	
<i>Tabebuia chrysantha</i> (Jacq.) G. Nicholson	Tabchr	I(0)	I(0.1)	III(0.8)	I(0.9)
<i>N.D.* (cuerno de venado)</i>	N.D.	V(2.3)	II(0.7)	III(0.7)	
<i>Cordia elaeagnoides</i> A. DC.	Corela		V(2.4)	III(0.9)	V(2.1)
<i>Lysiloma divaricata</i> (Jacq.) J.F. Macbr.	Lysdiv	II(0.7)	V(2.0)	IV(2.1)	I(0.1)
ESPECIES ACCIDENTALES					
<i>Pachycereus pecten-aboriginum</i> (Engelm.) Britton & Rose	Pacpect				I(0.1)
<i>Plumeria rubra</i> (Poir.) Woodson	Plurub				I(0.2)
<i>Cyrtocarpa procera</i> Kunth	Cyrpro				I(0.2)
<i>Opuntia exelsa</i> Sanchez-Mej.	Opuexe				I(0.2)
<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume	Tremig			I(0.2)	
<i>Bursera instabilis</i> McVaugh&Rzed.	Burins			I(0.2)	
<i>Piptadenia constricta</i> (Micheli) J.F. Macbr.	Pitcon		I(0.3)	I(0.06)	
<i>Quercus glaucoides</i> M. Martens & Galeotti	Quegla			I(0.4)	
<i>Lysiloma microphyllum</i> Benth.	Lysmic	II(1.7)	I(0.3)		
<i>Ruprechtia fusca</i> Fernald	Rupfus			I(0.3)	I(0.1)
<i>Randia thurberi</i> S. Watson	Ranthu		I(0.3)	I(0.1)	

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

Asociación C: *Luehea candida* Willd. (Luecan) y *Bauhinia divaricata* L. (Baudiv).

Fisonomía: Las especies de esta asociación están constituidas por dos alturas del estrato arbóreo en diferentes gradientes altitudinales. Para el primero alcanzan hasta 16 m y para el segundo alcanza hasta 20 m. Esta asociación se caracteriza por mantener árboles homogéneos con manchones dominantes de *Luehea candida*

Bauhinia divaricata, *Lonchocarpus caudatus* y *Ceiba aesculifolia* se presentan hasta con un 40% de cobertura. *Cochlospermum vitifolium* presenta un 20% o menos de cobertura, pero su constancia es presente en casi todos los sitios de la asociación.

Composición florística: En lo que respecta a la asociación C su comportamiento es similar a B, en lo que respecta a no tener especies exclusivas y que las especies que lo conforman presentan altos grados de presencia en la asociación a la que pertenecen a excepción *Cochlospermum vitifolium* que aparece con importante presencia en la asociación B, pero con poca frecuencia a diferencia de la asociación B, en donde se presenta casi en todos los relevés de la asociación a la que pertenece.

Luehea candida, *Cochlospermum vitifolium*, *Lonchocarpus caudatus* y *Ceiba aesculifolia* se presentan también en las asociaciones A y B, pero con valores de presencia y vitalidad disminuidos. Sólo *Bauhinia divaricata* no se presentan ni en A y B, sin embargo sí comparte con la asociación D, aunque también con menor presencia y vitalidad.

Las especies selectivas corresponden a *Bauhinia divaricata* y *Luehea candida* y el resto son especies preferenciales (Tabla 6).

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

Características ambientales: La asociación de *Luehea candida* y *Bauhinia divaricata* se localiza entre 330- 790 m.s.n.m.m; se asienta preferentemente sobre rocas de esquisto y en menor medida en andesitas y granito; presenta 5-58 cms de profundidad en los suelos, con porcentajes de arena para suelos derivados de esquistos entre 20- 60%, suelos derivados de andesita entre 30-65% de arena y derivados de granito >80% de arena; entre las asociaciones B y C es importante destacar las diferencia en cuanto a las texturas de los suelos; siendo más arenosas para B (tobas ácidas y andesitas) y en contraste los suelos para C (esquistos) presentan mayor cantidad de arcilla en el suelo, consecuencia del factor litológico.

La asociación C se presenta en las tres posiciones de ladera: superior, media y baja; con una forma de ladera predominantemente recta y en menor medida convexa; presentando pendientes entre 18° y 40°.

En el párrafo de la descripción fisonómica se mencionaron dos alturas del dosel, uno de 16 m localizado hasta los 500 m.s.n.m.m y un segundo escalón de hasta 20 m en los 500-700 m.s.n.m.m .

En lo que respecta al clima comparte el mismo de la asociación B, siendo este $BS_1(h')w(w)(i)gw''$ y cuya descripción se menciona anteriormente.

Asociación D: *Caesalpinia platyloba* S. Watson (Caepia) y *Caesalpinia eriostachys* Benth. (Caeri).

Fisonomía: Las especies de esta asociación están constituidas por árboles homogéneos que no rebasan los 10 m, los manchones de árboles tienen especies indicadoras y dominantes de *Caesalpinia eriostachys* y *Acacia houghii*, las cuales alcanzan hasta 40% de cobertura, con menor porcentaje de cobertura se encuentran *Caesalpinia platyloba*, *Erythroxylum*

mexicanum, *Bursera Coyucensis*, *Erythroxylum rotundifolia*, *Acacia houghii* y *Manihot intermedia* y *Gossypium aridum* alcanzando hasta 10% de cobertura.

Composición florística: La asociación D sólo presenta un 25% de las especies con valores altos de presencia (IV) y con valores de vitalidad más bajos que las demás asociaciones (1.0). Un 60% de las especies presenta valores medios (III) y vitalidades con valores medios a bajos (1.4 y 0.6). Las especies *Gossypium aridum*, *Manihot tomatophylla* S y *Acacia houghii* resultaron exclusivas pero su vitalidad no tiene valores importantes. Las especies selectivas las constituyen *Caesalpinia eriostachys* y *Caesalpinia platyloba*, el resto son especies preferenciales (Tabla 6). Esta asociación fue la única que presento especies accidentales de la familia de las cactáceas *Pachycereus pecten-aboriginum* (Engelm.) Britton & Rose y *Opuntia exelsa* Sanchez-Mejorada (Tabla 6).

Características ambientales: La asociación D ocupa rangos altitudinales < 400 m.s.n.m.m. y se establece sobre rocas de toba ácida-brecha volcánica, presenta suelos someros menores de 30 cms; y en la mayoría de los casos poco arenosos 10-20% de arena; las laderas en esta asociación, se presentan en laderas superiores y medias; con una forma de ladera predominantemente recta y en menor medida convexa; presentando pendientes entre 17° y 32°.

En lo que respecta al clima esta asociación presenta un $BS_0(h')w(w)(i)g$, el cual es similar al de las asociaciones B y C en cuanto a temperatura, distribución de la precipitación, oscilación y la marcha de la temperatura tipo Ganges, excepto que BS_0 , es el más seco de los secos, lo cual crea una condición particular, la cual se ve expresada en las especies que conforman esta asociación.

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

De las características ambientales descritas anteriormente podemos resaltar que la conformación contrastante de la composición (presencia de especies exclusivas) y estructura de la vegetación entre las asociaciones A y D está determinada por la diferencia altitudinal entre ellas, la cual genera climas con diferencias importantes de temperatura y precipitación teniendo un Aw1 en la asociación A (TMA 23° y PMA 1061 mm) y un clima BSo en la asociación D (TMA 28° y PMA 627 mm).

Por otro lado las asociaciones B y C comparten rangos altitudinales así como el mismo clima BS₁(TMA 28° y PMA entre 674 y 756 mm), mantienen especies vegetales en común (nula presencia de especies exclusivas), pero el mayor vigor de las especies diagnósticas se presenta en la asociación a la que pertenecen, la diferencia entre ambas reside en que se establecen predominantemente en diferentes tipos de roca.

Por último cabe mencionar que la tabla de fidelidad, también nos muestra las especies que conforman la serie de asociaciones para A, B y C representada por *Lysiloma divaricata* y *Luehea candida*, mientras para la asociación D corresponden a *Cordia elaeagnoides* y *Tabebuia chrysantha*.

ASOCIACIÓN	A	B	C	D
ALTITUD M.S.N.M. CLIMA	>950 Aw1(w)ig	330-505 BS1(h')w(w)(i)gw''	330-790 BS1(h')w(w)(i)gw''	< 400 BS0(h')w(w)(i)g
ALTURA MÁXIMA DEL DOSEL	20 m	16 m	< 400 altitud : 12 m >500-700 altitud: 20 m	10 m
LITOLOGÍA Y NUM. DE RELEVÉS	Granito (3)	Toba ácida (5) y Andesita (4)	Esquisto (11), Granito (3) y Toba ácida (3)	Toba ácida- Brecha volcánica (8)
PROF. DEL SUELO (CMS)	50- 70	15-60	5-58	3-32
TEXTURA DEL SUELO SEGÚN % DE ARENA	> 80 hasta 90%	suelos derivados de: tobas ácidas > 60 hasta 80% y en andesitas: 30-80%	suelos derivados de: esquistos: 20-60%; granito: >80 hasta 90% y toba ácida: 30-65%	10-20% de arena en más del 60% de los sitios, pero el resto alcanzó 80% de arena.
ESPECIES CARACT. DIAGNOSTICAS	<i>Lysiloma acapulcense</i> (Kunth) Benth., <i>Dalbergia granadillo</i> Pittier, <i>Coccoloba venosa</i> L., <i>Bursera simaruba</i> (L.), <i>Heliocarpus occidentales</i> Rose y <i>Coccoloba barbadensis</i> Jacq.	<i>Lonchocarpus hintonii</i> Sandwith., <i>Randia laevigata</i> Standl., <i>Bursera heteresthes</i> Bullock, <i>Amphipterygium adstringens</i> (Schltdl) Standl. y <i>Lonchocarpus eriocarinalis</i> Micheli.	<i>Luehea candida</i> Willd., <i>Cochlospermum vitifolium</i> (Wild.) Spreng., <i>Bauhinia divaricata</i> L., <i>Lonchocarpus caudatus</i> Pittier y <i>Ceiba aesculifolia</i> Britten & Baker F.	<i>Caesalpinia platyloba</i> S. Watson, <i>Erythroxylom rotundifolia</i> Lunan, <i>Caesalpinia eriostachys</i> Benth., <i>Acacia houghii</i> (Britton & Rose), <i>Bursera coyucensis</i> Bullock, <i>Manihot tomatophylla</i> Standl., <i>Erythroxylon mexicanum</i> Kunth y <i>Gossypium aridum</i> (Rose & Standl. Ex. Rose) Skovst.

Tabla 7 - Descripción de las condiciones ambientales que influyen en la distribución de las asociaciones del BTSC.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A pesar de contar en años recientes con numerosas publicaciones acerca del BTSC, las cuales abordaron una diversidad de temas científicos y con un alto valor académico para el caso de América latina (e.g., Chamela-Cuixmala en México, Guanacaste en Costa Rica, la Caatinga en Brasil, Bolivia y Venezuela), son pocos los trabajos del BTSC que aborden temas de corte sinecológico a través de catenas o gradientes. En el caso México destacan los trabajos de BALVANERA ET AL. (2002); SEGURA ET AL., (2003) y DURAN, E. (2004), los cuales fueron elaborados en un gradiente altitudinal (150m); en un gradiente de disponibilidad de humedad (a lo largo de una microcuenca de 1km) y gradiente de relieve y limitaciones del suelo respectivamente.

Al menos dos estudios recientes describen las necesidades conspicuas de investigación de los BTSC, en trabajos que incluyan la caracterización de la composición y la estructura; la nomenclatura o sintaxonomía y del arreglo de las comunidades a lo largo de catenas (SÁNCHEZ ET AL. 2005 a y b y MARSHALL ET AL. 2006). Es aquí donde nació el interés por recurrir a un marco de investigación fitosociológico con el fin de poder determinar asociaciones, a partir de sus especies diagnósticas e indicadoras que en general son los aspectos que mejor denotan el paisaje de los BTSC. Obtener información de este tipo sobre todo en una región como la zona de estudio, con una alta diversidad de especies endémicas (Miranda y Rzedowsky), en donde los trabajos de reconocimiento de la vegetación son prácticamente inexistentes se consideró de gran utilidad.

Por otro lado se destaca la utilidad del método fitosociológico el cual permite analizar la distribución de la vegetación, a través de gradientes en superficies importantes del terreno.

El trabajo no siguió de forma ortodoxa el método fitosociológico (no se consideraron los tres estratos), pero permitió generar información rápida y precisa en poco tiempo en una zona donde no existía ningún trabajo antecedente, lo que lo hace un trabajo con un importante valor al conocimiento en los BTSC.

Así, se describen por primera vez cuatro asociaciones, dos de ellas bien diferenciadas en cuanto a la composición florística de las especies diagnósticas que la conforman, y las otras dos compartieron buena parte de las especies diagnósticas, pero diferenciadas por presentar mayores grados de presencia y vitalidad en la asociación a la cual correspondieron. Las cuatro asociaciones mostraron una estructura bien definida en cuanto a la altura arbórea de los individuos.

Es importante mencionar que los rangos de porcentaje de cobertura utilizados en el método fitosociológico, no son aplicables para los BTSC, debido a la alta diversidad de especies y baja frecuencia de las mismas, condición opuesta a lo que ocurre en los ambientes templados. Por ello fue necesario diseñar nuevos rangos para el porcentaje de cobertura de la vegetación que representaron las características de porcentaje de cobertura y frecuencia de los BTSC.

De manera adicional se documentan las variables del medio físico que mejor describen la zonación de estas cuatro asociaciones. La asociación D (*Caesalpinia platyloba* - *Caesalpinia eriostachys*) ocupa rangos altitudinales menores a 400 m.s.n.m.m.; se establece sobre rocas de brecha volcánica, mantiene suelos someros y poco arenosos, y se ubica en el clima más seco (BS₀), mientras la asociación A (*Lysiloma acapulcensis* - *Dalbergia granadillo*) se localiza en altitudes >800 m.s.n.m.m. y se asienta sobre rocas graníticas, con suelos más profundos que D y texturas muy arenosas. Y se ubica en el clima más húmedo (Aw₁). Por su parte las asociaciones B

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

(*Amphipterygium adstringens* - *Randia laevigata*) y C (*Luehea candida* - *Bauhinia divaricata*) compartieron los mismos rangos altitudinales 400-800 m.s.n.m.m., por tanto el mismo clima (BS₁), teniendo espesores de suelos similares, pero las texturas fueron más arenosas para B (granitos y tobas acidas), ya que el factor litológico de C (predominio de esquistos) permitió el desarrollo de mayor cantidad de arcilla en el suelo.

La extensión de los patrones sinecológicos aquí descritos es un tema aún pendiente y será motivo de un trabajo posterior, en el cual se buscará extrapolar los patrones de distribución de la vegetación, obtenidos en el presente trabajo a otras áreas donde las condiciones climáticas, litológicas, características morfoedafológicas y condiciones de barlovento y sotavento entre las más evidentes sean similares, pues observaciones de campo en otras regiones del mundo donde prevalecen los BTSC indican que estos tipos de patrones son recurrentes.

En el presente trabajo no se realizó la clasificación sintaxonómica del método fitosociológico en el BTSC, porque se consideró atrevido determinarlo cuando en la zona de estudio este trabajo representa el primer esfuerzo en el conocimiento de la vegetación, y creemos hace falta contar con un mayor número de investigaciones referentes a la información florística de la zona.

El presente trabajo concluye que los factores como: litología, altitud, profundidad y textura del suelo ejercen una influencia significativa en la distribución de asociaciones vegetales, mientras los factores como: pendiente, curvatura en planta y posición de la ladera no presentan una correlación significativa con las asociaciones vegetales en la comunidad de BTSC de la porción al norte de la Sierra Madre del Sur. Es posible que los factores del relieve como: pendiente, curvatura en planta y posición de la ladera no hayan presentado una correlación significativa con la distribución del BTSC, porque la mayoría de los muestreos se hicieron sobre laderas con

pendiente superiores a 20° y en donde predominaron formas rectas en planta. Quizá los procesos como concentración de humedad y desarrollo del suelo, no presenten cambios sustanciales entre laderas de pendiente moderada a fuerte y con una forma recta a convexa, lo cual al mismo tiempo no expresen diferencias en el establecimiento de especies. Esta reflexión no es contradictoria con la correlación significativa encontrada entre la profundidad del suelo y la distribución de especies, porque dicha correlación estuvo asociada al tipo de roca. Por otro lado las superficies con pendiente suaves que por lo regular representan piedemontes y planicies se encuentran totalmente modificadas casi a nivel mundial, por lo que la correlación que pudiera existir entre dichas características y la vegetación representará por siempre un enorme hueco en el conocimiento de las comunidades ahí establecidas tan sólo décadas atrás. Aunque un trabajo de RAWITSCHER (1948) atribuye que la vegetación de un BTSC sólo se distribuya en la superficies de laderas en una porción de vegetación conservada de Brasil que abarca también áreas de planicie, debido a la discrepancias en el contenido de elementos nutritivos del suelo.

Contrariamente a lo que ocurre en la mayoría de los patrones de distribución de vegetación templada (VELÁZQUEZ & CLEEF 1994; BARBOUR & BILLINGS, 2000), la elevación *sensu stricto* no parece ser un factor determinante en la distribución de la vegetación de los BTSC. En la zona de estudio, por ejemplo, la elevación juega un papel local ya que los rangos de distribución de una determinada especie pueden variar independientemente del factor altitudinal. Sólo así, podemos explicarnos que especies como por ejemplo *Cochlospermum vitifolium* comience a aparecer en la zona de estudio a 300 m.s.n.m.m pero con una presencia baja y sólo arriba de los 600 m.s.n.m.m alcance una presencia y vitalidad importante. Esta misma especie, sin embargo, se distribuye al nivel del mar con la misma condición de vitalidad en las laderas expuestas al Océano Pacífico, siendo el factor humedad el

cual juega un papel fundamental entre laderas expuestas a barlovento y sotavento, permitiendo el desarrollo de dicha especie por la cantidad de humedad y no por el factor altitudinal.

Por otro lado, un aspecto regularmente documentado a escalas globales y regionales es la relación entre la riqueza fitoespecífica y las condiciones ambientales. Al respecto, GENTRY (1988) encontró que la precipitación ejerce de forma general una fuerte influencia en la riqueza y distribución de especies en los bosques tropicales de diversas partes del mundo. Para México LOTT (1987) postula que dicho patrón no aplica y esto es apoyado por TREJO (1998) quien encuentra mejor correlación entre la riqueza de especies y la evapotranspiración. TREJO (1998) reconoce para dos puntos de muestro en su estudio, que los distintos tipos de roca juegan un papel fundamental en la distribución de las especies aún en sitios de muestreo con una cercanía geográfica significativa. Investigaciones específicas han encontrado que la altitud, geología, características físicas y químicas de los suelos tienen una importante correlación en la distribución y riqueza de especies en los BTSC (HUSTON, 1980; OLIVEIRA FILO ET AL., 1994, 1998; PYKE 2001; DEL BON ET AL. 2002; VILLERS ET AL., 2003 y DURAN E., 2004). Es necesario destacar que la mayoría de los atributos pertenecientes estrictamente al relieve (curvatura en planta, pendiente, exposición, posición de ladera), no tuvieron una relación importante con la distribución de las asociaciones vegetales en el BTSC en la zona de estudio, a excepción del atributo de altitud como un factor local indirecto del clima.

De la revisión de los estudios realizados anteriormente, es posible postular que existen factores que tienen un efecto regional y otros influyen de forma local en los patrones de distribución de la vegetación del BTSC. Así, el clima (máximos y mínimos de temperatura y precipitación) y la evapotranspiración resultan ser aspectos de importancia regional mientras las condiciones litológicas y las características físicas y químicas de las unidades

morfoedáficas (relieve-suelo) influyen en el balance hídrico (disponibilidad de agua), lo cual afecta la distribución en los patrones de vegetación locales. El entendimiento y conjugación de ambos es necesario para la predicción de patrones de distribución en los BTSC.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo financiero otorgado a través del proyecto PAPIIT (Programa de Investigación e Innovación Tecnológica) de la UNAM (ref. IN112803), el cual fue crucial para realización del trabajo de campo.

Gracias, a la Universidad P. Sabatier (Francia) por poner a nuestra disposición la imagen SPOT a través del programa ISIS (Incitation à l'Utilisation Scientifique des Images SPOT) en el ámbito de colaboración con la dicha universidad.

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que participaron en el trabajo de campo. Al señor Don Pablito Valladares, quien fue nuestros ojos, por su enorme apoyo y conocimiento empírico de las especies vegetales. A Colegas y amigos que me aportaron conocimientos y ayuda para la recopilación de la información florística y medioambiental; MenC. Xavier Madrigal; Biol. Camilo Alcántara, Biol. Rafael Mayorga, Biol. Consuelo Medina, Dra. Elvira Durán y Dr. Jean François Mas.

Muchas gracias a los revisores del manuscritos por sus importantes comentarios y aportaciones; al Dr. Jean-François Mas y Biol. Consuelo Medina.

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE, R. (2000): GUÍA PRÁCTICA PARA LOS ÁRBOLES Y ARBUSTOS DE LA REGIÓN DE TIERRA CALIENTE, MICHOACÁN, MÉXICO. ENVIRONMENTAL & CONSERVATION PROGRAMS THE FIELD MUSEUM OF NATURAL HISTORY, THE ANDREW MELLON FOUNDATION Y ELLEN HYNDMAN FUND. CHICAGO, USA.

BACH, K., KESSLER, M. & GONZALES, J. (1999): CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE LOS BOSQUES DECIDUOS ANDINOS DE BOLIVIA EN BASE A GRUPOS INDICADORES BOTÁNICOS. *Ecol. Bolivia* 32:7-22.

BALVANERA, P., LOTT, E., SEGURA, G., SIEBE, C. E ISLAS, A. (2002): Patterns of β -diversity in a Mexican tropical dry forest. *Journal of Vegetation Science* 13: 145-158.

BARBOUR, M.G. & BILLINGS, W. D. (2000): North American Terrestrial Vegetation. - Cambridge University Press, 573-592 pp.

BRAUN-BLANQUET J.J. (1979): Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales. - H. Blume ediciones. España. 820 pp.

BULLOCK, S. H., MOONEY H.A. & MEDINA, E. (1995): Seasonally Dry Tropical Forest. - Cambridge University Press, Cambridge. 450 pp.

CLEMENTS, F.E. (1916): Plant sucession. Analysis of the development of vegetation. - Carnegie Inst. Washington. 512 pp.

COSTANZA, R., D'ARGE, R., DE GROOT, R., FARER, S., GRASSO & M., HANNON, B. (1997): The value of the world's ecosystem services and natural capital. - *Nature*, 15, 253-260.

DEL BON, F., TEIXEIRA DE OLIVEIRA, A., MENDONÇA, E., SANTOS, J., LEITE, M., & GRANATE DE SÁ, J.J. (2002): Variáveis ambientais e a distribuição de espécies arbóreas em um remanescente de floresta estacional semidecídua montana no campus da Universidade Federal de Lavras, M.G. - Acta bot. Bras. 16(3): 331-356.

DURAN, E. (2004): Estructura, Diversidad y Mortalidad del componente arbóreo en un mosaico ambiental de Chamela, Jalisco. - Tesis de doctorado. Instituto de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México. 135 pp. México.

FAO (2002): Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2000 – Informe Principal. Estudios Montes 140. pp. 384. Roma.

GARCÍA, E. (2004): Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. - Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. -Serie Libros. No. 6. 90 pp. México.

GARDUÑO, V.H., CORONA, P., ISRADE, I., MENNELLA, L., ARREYGUE, E., BIGIOGGERO, B. & CHIESA, S. (1999): Carta Geológica del Estado de Michoacán, Escala 1:250,000. - Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Departamento de Geología y Mineralogía. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo Morelia, Michoacán. 111 pp. México.

GEIST, H.J. & LAMBIN, E.F., (2001): What Drives Tropical Deforestation? A metaanalysis of proximate and underlying causes of deforestation based on sub-national case study evidence. - Lucc Report Series No. 4, 116 pp. Louvain-la-Neuve, Belgium.

GENTRY, A.H. (1982): Patterns of Neotropical plant species diversity. Evolutionary. - Biology 15: 1-54

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

GENTRY, A.H. (1988): Changes in plant community diversity and floristic composition on environment and geographical gradients. - *Annals of the Missouri Botanical Garden* 75: 1-34.

HERNÁNDEZ-TORO, I. (2003): Flora y Vegetación de entre los ríos Tecolotlán y María García, Municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán, Jalisco, México. Tesis de doctorado, Universidad de Salamanca, España.

HILL, M.O. (1979): TWINSpan- A FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of individuals and attributes. Cornell University Press, Ithaca N.Y. 90 pp.

HOUGHTON, R.A., LEFKOWITZ & SKOLE, D.L. (1991): Changes in the landscape of Latin America between 1859 and 1985. I. Progressive loss of forest. - *Forest Ecology and Management*, 38: 143-172.

HUSTON, M. (1980): Soil nutrients and tree species richness in Costa Rican forest. - *Journal of Biogeography*, 7: 147-157.

INEGI (1980): Sistema de Clasificación de Tipos de Agricultura y Tipos de Vegetación de México para la Carta de Uso del Suelo y Vegetación de INEGI, escala 1: 250,000. - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags. 49 pp. México.

JANZEN, D. (1988): Tropical dry forest. The most endangered major tropical ecosystems. - In : Wilson E.O. (ed.) *Biodiversity National*. Academy Press, pp 130-137. - Washington, D.C..

JONGMAN, R.H.G., TER BRAAK C.J.F. & VAN TONGEREN, O.F.R. (1995): Data analysis in community and Landscape Ecology. - Cambridge University Press, Cambridge. 299 pp

KENT M., COKER P. (1992): Vegetation description and analysis. A practical approach. - Belhaven Press. London. 362 pp.

KESSLER, M. & K. BACH (1999): Using indicator families for vegetation classification in species-rich Neotropical forests. – *Phytocoenologia*, 29(4).

LAMBIN, E. F., TURNER, B. L., HELMUT, J., GEIST, S. B., AGBOLA, S. B., ARILD, A., BRUCE, J. W., COOMES, O. T., DIRZO, R., FISCHER, G., FOLKE, C., GEORGE, P. S., HOMEWOOD, K., IMBERNON, J., LEEMANS, R., LI, X., MORAN, E. F., MORTIMORE, M., RAMAKRISHNAN, P. S., RICHARDS, J. F., SKANES, H., STEFFEN, W., STONE, G. D., SVEDIN, U., VELDKAMP, T., VOGEL, A. & C., XU, J. (2001): The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. - *Global Environmental Change* 11: 261 –269.

LOTT, E., BULLOCK, S.H. & SOLÍS-MAGALLANES E. (1987): Floristic diversity and structure of upland and arroyo forest of Coastal Jalisco. - *Biotropica* 19: 228-235.

MARSHALL E., SCHRECKENBERG & NEWTON, A.C. (2006): Commercialization of non-timber forest products. Factors influencing success. Lessons learned from Mexico and Bolivia and policy implications for decision-makers. Edit. Marshall, Schreckenberg y Newton, 136 pp - United Nations Environment Programme (UNEP). World Conservation Monitoring Centre (WCMC).

MARTÍNEZ-RAMOS, M. (1995): Regeneración natural y diversidad de especies arbóreas en selvas húmedas. - In: Delfin G., H., Parra T., V. y Echazarreta O., O. (eds.): Conocimiento y manejo de las selvas de la península de Yucatán. pp. 27-55. - Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida Yucatán.

MAS, J. F. & PÉREZ-VEGA, A. (2005): La representatividad del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SINAP). - *Gaceta Ecológica*.

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

Instituto Nacional de Ecología- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. No. 74. pp. México.

MCCUNE, B. & MEFFORD M. J. (1995) : Multivariate analysis of Ecological data. Version 2.0. - MjM Software design. Gleneden Beach, Oregon, USA. pp. 89.

MILES, L., NEWTON, A.C., DEFRIES, R.S., RAVILIOUS, C., MAY, I., BLYTH, S., KAPOS, V. & GORDON, J. E. (2006): A global overview of the conservation status of tropical dry forest. - *Journal of Biogeography*. 33: 491-505.

MIRANDA, F., (1947): Estudios sobre la vegetación de México. V. Rasgos de la vegetación en la cuenca del Río de las Balsas. - *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 8: 95-114.

MUELLER & ELLENBERG (1974): *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. - John Wiley & Sons. 547 pp.

MURPHY, P. & LUGO, E. (1986): Ecology of tropical dry forest. - *Annals Review Ecology and Systematics*. 17: 67-88.

OLIVEIRA- FILHO, A.T., CURI, N., VILELA, E., & CARVALO, D. (1998): Effects of Canopy gaps, topography and soils on the distribution of woody species in Central Brazilian deciduous dry forest. - *Biotropica*. 30: 362-375.

OLIVEIRA-FILHO, A.T., VILELA, E., CARVALHO, D. A. & GAVILANES, M. (1994): Effect of soils and topography on the distribution of tree species in a tropical riverine forest in south-eastern Brazil. - *Journal of tropical Ecology*. 10: 483-508

ORTIZ, M.A. (2000): *Diferenciación Tipológica de las Regiones Ecológicas de México*: 1: 250,000. - Programa de actualización del ordenamiento ecológico general del territorio del país. Dirección General de Normatividad Ambiental. 30 pp. México.

PALACIO-PRIETO, J.L., BOCCO, G., VELÁZQUEZ, A., MAS, J.F., TAKAKI-TAKAKI, A., VICTORIA, A., LUNA-GONZALEZ, L., GÓMEZ-RODRIGUEZ, G., LÓPEZ-GARCÍA, J., PALMA, M., TREJO-VELÁZQUEZ, I., PERALTA, A., PRADO-MOLINA, J., RODRÍGUEZ, A., MAYORGA-SAUCEDO, & R., GONZALEZ-MEDRANO, F. (2000): La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Nacional Forestal 2000. - *Investigaciones Geográficas (UNAM)* 43:183-203.

PYKE, C. R., CONDIT, R., AGUILAR, S. & LAO, S. (2001): Florist composition across a climatic gradient in a neotropical lowland forest. - *Journal of Vegetation Science*. 12: 553-566.

RAWITSCHER, F. (1948). The water economy of the vegetation of the "Campos Cerrados" in southern Brazil, *Journal Ecology*. 36:237-268.

RZEDOWSKI, J. (1978): *Vegetación de México*. - Limusa, México. 432 pp.

RZEDOWSKI, J. (1991): El endemismo en la flora fanerogámica mexicana: una apreciación analítica preliminar. - *Acta Botánica Mexicana* 15: 47-64.

SALAZAR, G. (2008): *El Bosque Tropical Caducifolio en la microcuenca de San José de Chila, tributario del río Tepalcatepec, municipio de Apatzingan, Michoacán, México*. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

SANCHEZ-AZOFEIFA, A., KALACSKA, M., QUESADA, M., CALVO-ALVARADO, J., NASSAR, J., & RODRIGUEZ, J. (2005) a: Need for Integrated Research for a Sustainable Future in Tropical Dry Forests. - *Conservation Biology*. 19(2): 285-286.

SANCHEZ-AZOFEIFA, A., QUESADA, M., RODRIGUEZ, J., NASSAR, J., STONER, K., CASTILLO, A., GARVIN, T., ZENT, E., CALVO-ALVARADO, J., KALACSKA, M.,

Distribución de las asociaciones de un bosque tropical seco caducifolio a través de gradientes: relieve, litología y suelo desde una perspectiva fitosociológica y espacial en Michoacán, México

FAJARDO, L., GAMON J. & CUEVAS-REYES P. (2005) b: Research Priorities for Neotropical Dry Forests. - *Biotropical*. 37 (4): 477-485.

SCHLICHTING, E., BLUME, H.-P. Y STAHR, K. (1995): *Bodenkundliches Praktikum*. 2a edición, Pareys Studentexte 81, Editorail Blackwell Wissenschaft, Berlin-Wien.

SEGURA, G., BALVANERA, P., DURÁN, E. & PÉREZ, A. (2003): Tree community structure and ítem mortality along a water availability gradient in a Mexican tropical dry forest. – *Plant Ecology*. 169: 259-271.

SIEBE C., JAHN R. & STAHR K. (1996): *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. – Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Publicación especial 4. 57 pp. México.

TER BRAAK, C. J. F. (1986): Canonical Correspondence Analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. - *Ecology*. 67: 1167-1179.

TERBORGH, U. (1992): *Diversity and the tropical rain forest*. - Scientific American Library. New York, 243 p.

TREJO, I. (1998): *Distribución y Diversidad del Selvas Bajas de México: Relación con el Clima y el Suelo*. -Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 210 pp. México.

TREJO, I. (2000): Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. - *Biological Conservation* 94: 133-142.

VELÁZQUEZ, A. & CLEEF, A. M. (1993): The plant communities of the volcanoes “Tláloc” and “Pelado”, México. - *Phytocoenologia*, 22 (2):145-191.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

VELAZQUEZ, A., BOCCO, G., ROMERO, F. & PÉREZ VEGA, A. (2003): A Landscape Perspective on Biodiversity Conservation. The Case of central Mexico. - Mountain Research and Development. 23(3): 240-246.

VILLERS, L., TREJO, I. & LOPEZ, J. (2003): Dry vegetation in relation to the physical environment in the Baja California Peninsula; México. - Journal of vegetation Science 14: 517-524.

WERGER, M. J. A, (1974): On concepts and techniques applied in the Zurich-Montpellier method of vegetation survey. - Bothalia 11: 309-323.

INTEGRACIÓN DE LOS ATRIBUTOS RELIEVE, LITOLOGIA Y SUELOS Y LA ELABORACIÓN DE UN MODELO ESPACIO TEMPORAL DE LA DISTRIBUCIÓN Y DE LA DINÁMICA DE UN BOSQUE TROPICAL SECO CADUCIFOLIO

INTRODUCCIÓN

Recientemente, la combinación de diferentes disciplinas y herramientas como la estadística, la inteligencia artificial, la percepción remota y los Sistemas de Información Geográfica (SIGs), han permitido el mejoramiento de la representación espacial de las cubiertas del suelo. En particular, se reportaron en la literatura avances importantes en:

- La cartografía de la vegetación gracias en particular al mejoramiento de los datos de percepción remota (mejor resolución espacial, espectral, etc.), de los métodos de procesamiento y a la combinación de estos datos de percepción remota con datos auxiliares (modelos digitales de elevación, mapas temáticos, datos recopilados en campo, etc) (Pedroti, 2004)
- Mejoramiento del monitoreo de la dinámica de las cubiertas del suelo en particular gracias a la utilización de datos multitemporales y al desarrollo de métodos de procesamiento más robustos (Clark et al. 2005).
- Desarrollo de modelos predictivos de la distribución de habitats ecológicos a partir de atributos ambientales que presentan correlación con la distribución de comunidades (Guisan y Zimmermann, 2000).

Los estudios que atienden de manera parcial cada uno de los aspectos antes mencionados en general son abundantes para ecosistemas templados. Entre los esfuerzos en ámbitos tropicales destacan de manera sustancial los que documentan procesos en bosques tropicales húmedos o perennes (Duivenvoorden y Lips, 1995; Nichols et al., 1998).

De lo anterior se desprende la relevancia de realizar estudios que contribuyan al desarrollo de metodologías integrales que permitan traducir el conocimiento puramente científico en base para acciones concretas de manejo a futuro. Los objetivos del presente capítulo buscan la representación de la distribución y dinámica espacio-temporal de las asociaciones de un Bosque Tropical Seco Caducifolio (BTSC). Para tal fin se recurre a métodos de análisis difusos y correlaciones ponderadas de los atributos del relieve y el suelo que mejor explican la distribución de dichas asociaciones, tal proceso con lleva a una representación espacial con mayor detalle.

Por otro lado, a través de la adición de la representación de los cambios del uso del suelo, se determina la vulnerabilidad para cada una de las asociaciones ante los procesos de deforestación en la zona de estudio.

Otro objetivo del presente trabajo es la proyección, a través de un modelo predictivo, de la distribución potencial de la vegetación. Los resultados son discutidos a la luz de su relevancia para fines de cartografía de la vegetación, planificación del uso del suelo y conservación.

Este tipo de estudio se considera fundamental, ya que la información sobre la cubierta vegetal en nuestro país en escalas 1:50,000 se remonta a los trabajos elaborados por INEGI en los años 80's (no cubre todo el país) y debido a la fuerte pérdida que han sufrido los BTSC en las últimas décadas. Cabe mencionar que los BTSC y subcaducifolios ocupan el segundo lugar de importancia en cuanto a superficie a nivel nacional (Palacio et al., 2000) y en

el estado de Michoacán representan el primer lugar también junto con los BTS subcaducifolio (Mas et al., 2005).

La construcción de la cartografía de la cubierta vegetal tradicionalmente se ha realizado a través de la interpretación visual y/o automatizada de fotografías aéreas e imágenes de satélite. Debido a las limitaciones de la información que se puede extraer de estas imágenes (diferentes cubiertas vegetales pueden presentar respuestas espectrales muy similares), se usa actualmente información adicional, la cual permite obtener resultados de la representación cartográfica de la vegetación con un mayor detalle y mejor fiabilidad. En el presente trabajo la información adicional la constituyeron los atributos del relieve y suelo, información que en últimas décadas resultó de gran utilidad debido al avance y desarrollo de nuevas tecnologías en la producción de Modelos Digitales de Elevación (MDE). En el caso de áreas montañosas este tipo de insumos permite a menudo mejorar la cartografía de la cubierta del suelo obtenida por el análisis de imágenes de satélite (Mas y Pérez-Vega, 2003).

METODOLOGÍA

El presente trabajo consta de cuatro etapas: 1. Interpretación visual de ortofotos e imágenes satélite, para elaborar los mapas de vegetación y uso del suelo del 1993 y 2002, 2. Elaboración de un mapa de distribución potencial de las asociaciones del BTSC utilizando atributos del relieve mediante un enfoque difuso, 3. Sobreposición de los mapas anteriormente citados para obtener mapas de vegetación más detallados para el caso del BTSC y 4. Elaboración de un mapa de cambio de las diferentes cubiertas vegetales y uso del suelo, resaltando de manera específica el caso de las asociaciones del BTSC, para determinar cuáles de ellas sufrieron mayor

deforestación (Fig. 1). A continuación se detalla la metodología de esas cuatro vertientes del estudio.

Elaboración de los mapas de vegetación y uso del suelo de 1993 y 2002

La representación espacial de la cubierta vegetal fue llevada a cabo mediante dos interpretaciones visuales: 1. Interpretación de ortofotos (fotografía aéreas georeferenciadas) escala 1:20,000 de INEGI del año 1993 (resolución 2m), información que fue generada en el programa ILWIS, debido a la facilidad para el proceso de digitalización. Durante la interpretación visual de las ortofotos se consideraron los criterios siguientes: 1) el tono, el cual se refiere a la intensidad relativa de luz reflejada por el terreno y registrada sobre la película, 2) la textura que representa la frecuencia de cambio de tonalidad en la foto (ASP, 1952) y 3) la forma de los objetos que facilitó particularmente la identificación de los rasgos de origen antrópico (zonas de cultivo, poblados, carreteras, líneas de electrificación, canales de agua, etc.).

La actualización de la información de la cubierta vegetal y uso del suelo al año 2002, se obtuvo mediante el método de interpretación interdependiente, a través de imágenes de satélite SPOT (resolución 10 m), dicho método consiste sencillamente en actualizar la información del uso del suelo y vegetación de la primera fecha (1993) con base en la interpretación visual de la imagen de la segunda fecha (2002), para registrar los cambios de los polígonos que sufrieron modificaciones (FAO, 1996). Este método evita los problemas de efectos de borde al sobreponer la información de las dos fechas (1993-2002) y las incongruencias de interpretación. La interpretación visual de la información más reciente, es un proceso híbrido que se realiza mediante la combinación entre clasificación en pantalla con la herramienta de clasificador de objetos por crecimiento de región en el programa GGeoVIS y de la interpretación visual en pantalla utilizando una composición a color de la imagen. Este proceso híbrido entre interpretación visual y clasificación

digital presenta las ventajas de ambos enfoques (rapidez del procesamiento digital, fiabilidad del visual), lo cual permitió actualizar los cambios en la vegetación y obtener el mapa de cambio de cubierta vegetal y uso del suelo para el año 2002 (Figura 1).

Los procesos de asignación del atributo y sobre posición de cubiertas fueron llevados a cabo en el programa ARC/INFO, debido a la facilidad que proporcionó para tal finalidad.

La validez de la interpretación se corroboró con diversas salidas a campo, para verificar dudas en la identificación de algunos tipos de vegetación y los límites de éstos.

En los mapas de 1993 y 2002 fue necesario homogeneizar el área mínima mapeable, ya que los insumos para ambas fechas tuvieron diferentes resoluciones. Las imágenes de 1993 consistieron de ortofotos (fotografías aérea georeferenciadas) escala 1:20,000 con una resolución de 2 m y la información de 2002 fue un compuesto en falso color de una imagen SPOT con resolución de 10 m.

Elaboración del mapa de distribución potencial de las asociaciones de BTSC

La representación espacial de la vegetación potencial de las asociaciones del BTSC se llevó a cabo a través de un enfoque de lógica difusa (o borrosa), que es una generalización de la lógica exacta (Booleana) que fue desarrollada por L.A. Zadeh en la década de los años 60. En el caso del presente estudio, este enfoque difuso permite describir la relación entre la posibilidad de encontrar cierta asociación vegetal de BTSC y ciertos atributos del relieve y del suelo. Estas operaciones difusas permitieron representar de forma espacial a través de mapas, la distribución de las diferentes

asociaciones del BTSC frente a los atributos del relieve. Estos mapas se pueden interpretar como mapas difusos (*fuzzy*) de distribución potencial (Brzeziecki et al., 1993; Francklin, 1995; Goodchild, 1994).

La lógica difusa reconoce más que simples valores verdaderos y falsos; las proposiciones en lógica difusa pueden ser representadas con grados de veracidad o falsedad. Este enfoque ha sido probado para ser particularmente útil en sistemas expertos y otras aplicaciones de inteligencia artificial. Por medio de la lógica difusa pueden formularse matemáticamente nociones como “un poco caliente” o “muy frío”, para que sean procesadas por computadoras y cuantificar expresiones humanas vagas, tales como "Muy brillante" o "relativamente brillante". Todo ello es un intento de aplicar la forma de pensar humana a la programación de las computadoras.

Los conjuntos difusos son conjuntos (o clases) sin bordes categóricos, es decir, la transición entre pertenencia y no pertenencia del conjunto de datos es gradual (Zadeh, 1965). Un conjunto difuso es caracterizado por un grado de pertenencia (también llamado posibilidad) con rangos de 0.0 a 1.0, indicando un incremento continuo desde no pertenencia a pertenencia total.

Si $f_A(x)$ indica la función de pertenencia de x al conjunto A , entonces

$f_A(x)$ varía entre 0 y 1

si $f_A(x)=1$, x pertenece totalmente a A

si $f_A(x)=0$, x no pertenece a A

Por ejemplo, la FAO considera un bosque como “cerrado” cuando la cubierta de dosel es superior al 40%. En lógica Booleana, un bosque con un cobertura de 39% no se va a considerar como cerrado mientras que en lógica difusa la pertenencia a “bosque cerrado” se puede expresar de forma gradual dependiendo del porcentaje de cobertura del dosel (Figura 1).

Integración de los atributos relieve, litología y suelos y la elaboración de un modelo espacio temporal de la distribución y de la dinámica de un bosque tropical seco caducifolio

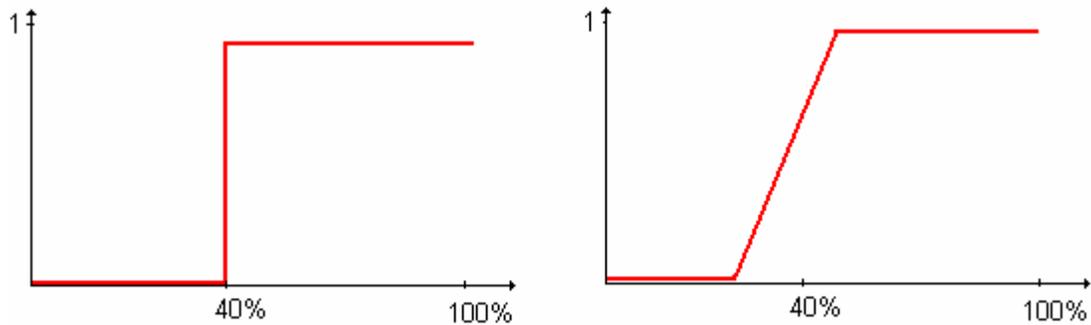


Figura 1 - Expresión de la pertenencia a “bosques cerrado” en lógica Booleana (izquierda) y difusa (derecha).

Los operadores lógicos que se utilizan en lógica difusa (AND, OR, etc.) se definen mediante un "principio de extensión" por el cual gran parte del aparato matemático clásico existente puede ser adaptado a la manipulación de los conjuntos difusos. Los operadores usados más comúnmente son OR y AND, los cuales permiten evaluar la pertenencia de un elemento a dos conjuntos de manera alternativa (unión de los conjuntos) o conjunta (intersección). La pertenencia a la unión de dos conjuntos A y B (operador OR) es el máximo de los valores de pertenencia a A y a B mientras el valor de pertenencia a la intersección (operador AND) es igual al mínimo de los valores de pertenencia a A y a B. El operador AND que determina la pertenencia con el mínimo valor de los valores de pertenencia en los dos conjuntos evaluados asigna un valor de pertenencia alto sólo si los valores de pertenencia a ambos conjuntos son altos, por lo que evalúa la pertenencia bajo condiciones más rigurosas.

En el caso de información espacial, el operador AND se aplica a dos capas de información espacial píxel a píxel, generando un nuevo mapa difuso. Posteriormente para obtener una salida Booleana, se lleva a cabo la *defuzificación*, proceso por el cual se selecciona el conjunto para el cual el objeto presenta el mayor valor de pertenencia. En el caso de mapas difusos, se compara, píxel a píxel, los valores difusos de pertenencia a las diferentes

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

categorías y se asigna finalmente al píxel la categoría con el valor de pertenencia más alto (comando “harden” en IDRISI).

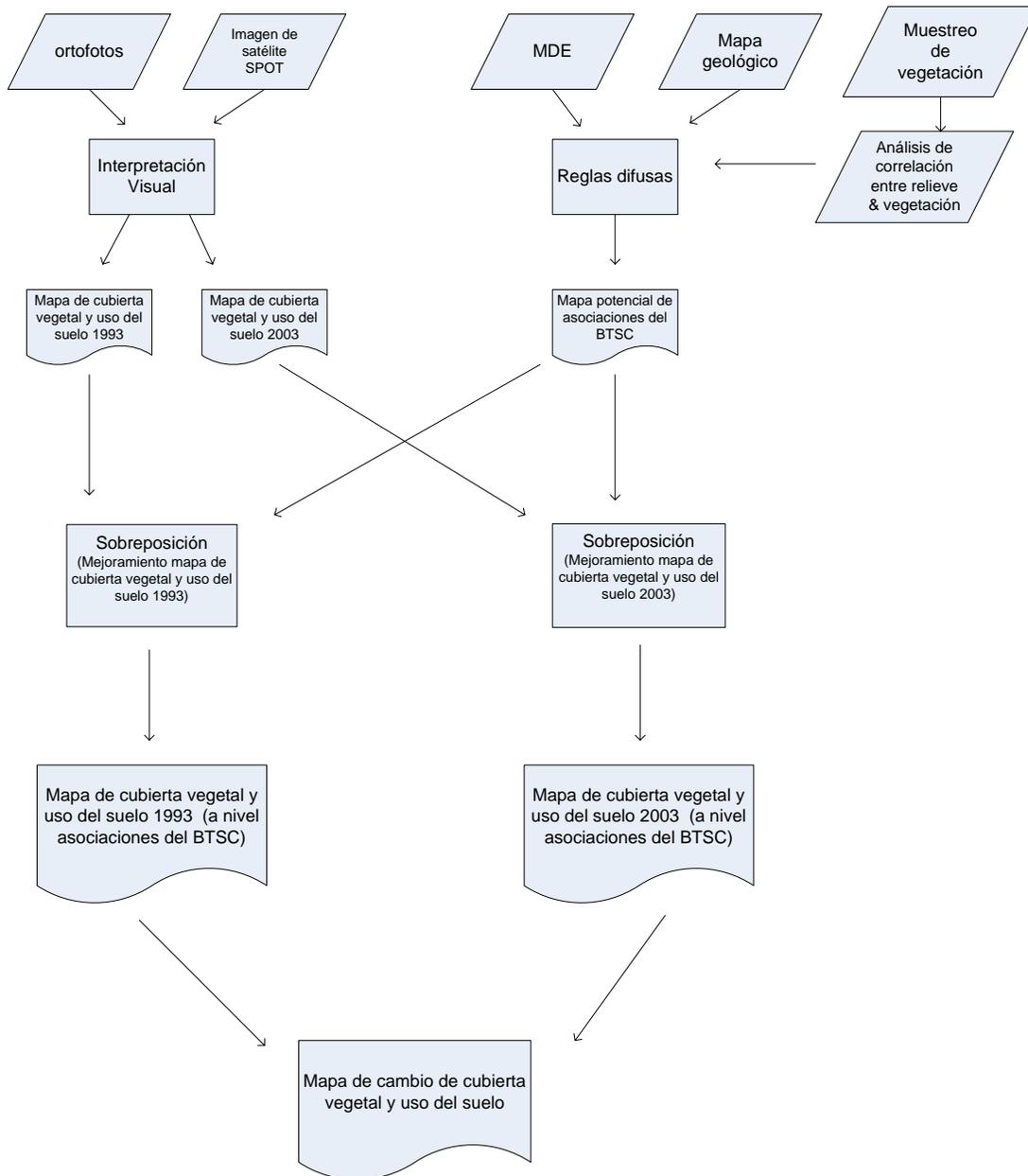


Figura 2 - Diagrama de Flujo de los pasos metodológicos para el modelado de la distribución del BTSC.

Integración de los atributos relieve, litología y suelos y la elaboración de un modelo espacio temporal de la distribución y de la dinámica de un bosque tropical seco caducifolio

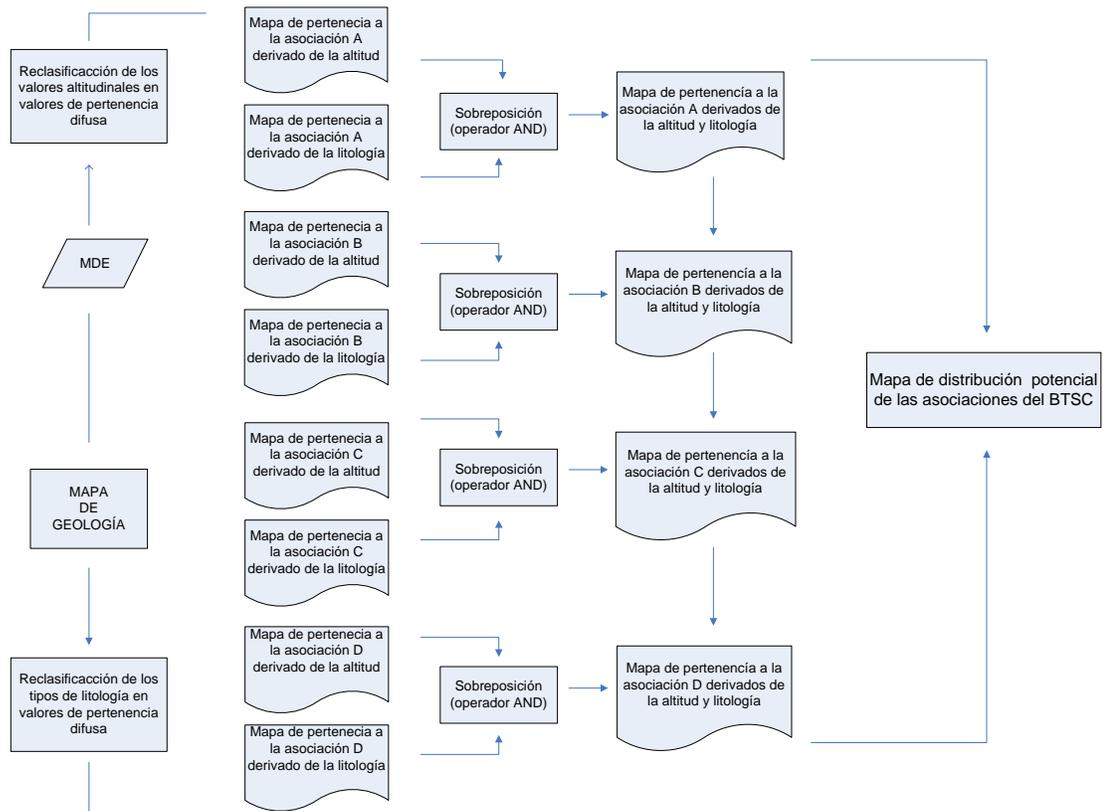


Figura 3 - Diagrama de flujo de los reglas difusas para la obtención del mapa de vegetación potencial de las asociaciones del BTSC.

La modelización lógica difusa fue llevada a cabo considerando los resultados y la correlación entre la distribución de las especies vegetales de las asociaciones y los atributos del relieve: litología, altitud, profundidad del suelo y porcentaje de arena (toba ácida brecha-volcánica -.937, granito -.680, esquisto .770; altitud .635; profundidad del suelo .558 y porcentaje de arena -.532), dejando fuera otros atributos como: curvatura en planta, pendiente, exposición y posición de ladera, los cuales no tuvieron una correlación importante (Tab. 1).

Tabla 1 - Valores de correlación significativa obtenidos a través del análisis de CCA.

VARIABLES	EJE 1	EJE 2	EJE 3
ALTITUD	0.635	-0.322	-0.570
LITOLOGÍA			
Toba ácida- Brecha volcánica	-0.937	-0.266	-0.119
esquisto	0.240	0.770	-0.293
granito	0.429	-0.680	-0.503
PROPIEDADES DEL SUELO			
profundidad del suelo	0.558	-0.305	0.175
porcentaje de arena	0.401	-0.532	0.229

Es necesario señalar que a pesar de que los atributos de profundidad del suelo y porcentaje de arena resultaron con una correlación importante no fue posible considerarlos en la representación espacial por no contar con datos cartográficos de los mismos, quedando solamente la litología y altitud.

Este proceso se llevó a cabo en IDRISI, primero con la información litológica (Garduño et al., 1999) asignando un valor de pertenencia para cada una de las cuatro asociaciones con las especies diagnósticas que las conformaban para cada uno de los tipos de roca (Figura 2). Después se realizó el proceso difuso para la información altitudinal, donde previamente se elaboraron gráficas para representar las curvas que permitieron asociar los valores altitudinales a valores de pertenencia difusa tomando en cuenta la suma del porcentaje de cobertura para cada una de las especies diagnósticas y los valores altitudinales (Figura 2).

Integración de los atributos relieve, litología y suelos y la elaboración de un modelo espacio temporal de la distribución y de la dinámica de un bosque tropical seco caducifolio

La obtención combinada de los resultados difusos tanto en la litología y la altitud permitió elaborar el mapa de vegetación potencial para cada una de las asociaciones a través del operador AND (Figura 3).

Finalmente, el último paso fue la agregación de los mapas difusos de pertenencia a cada una de las cuatro asociaciones mediante el proceso de defuzificación, dando como resultado el mapa de distribución potencial.

Mejoramiento del mapa de cubierta vegetal y uso del suelo 1993 y 2002

La elaboración del mapa final de vegetación y uso del suelo, se llevó a cabo agregando la información del mapa potencial de las asociaciones del BTSC a los mapas de cubierta vegetal y uso del suelo de los años 1993- 2002, logrando tener el nivel de asociación en las comunidades vegetales de los BTSC (Figura 3), pretendiendo posteriormente evaluar las tasas de deforestación para cada una de las asociaciones.

Análisis de los cambios en las asociaciones del BTSC y otras cubiertas vegetales

Se llevó a cabo la sobreposición de los mapas anteriores en ambas fechas, lo que permitió representar los cambios en las cubiertas, para elaborar las matrices de cambio, calcular las tasas de deforestación en las diferentes cubiertas vegetales y también de forma específica para cada uno de las asociaciones del BTSC; identificando cuál o cuáles de ellas sufrieron mayor pérdida en su cubierta original (Figura 1).

El cálculo de la tasa de cambio correspondiente a los diferentes usos y cubiertas vegetales se realizó a través de la ecuación 1 (FAO, 1996).

$$t = \left(1 - \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde t es la tasa de cambio (para expresar en % hay que multiplicar por 100)

S_1 superficie en la fecha 1,

S_2 superficie en la fecha 2,

n es el número de años entre las dos fechas

El cálculo de la pérdida anual en superficie para cada tipo de vegetación se hizo con la ecuación 2.

$$Pa = (S_2 - S_1) / n \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde P_a pérdida anual en superficie, S_1 superficie de la cubierta vegetal en la fecha 1, S_2 superficie de la cubierta vegetal en la fecha 2, n periodo de tiempo analizado.

RESULTADOS

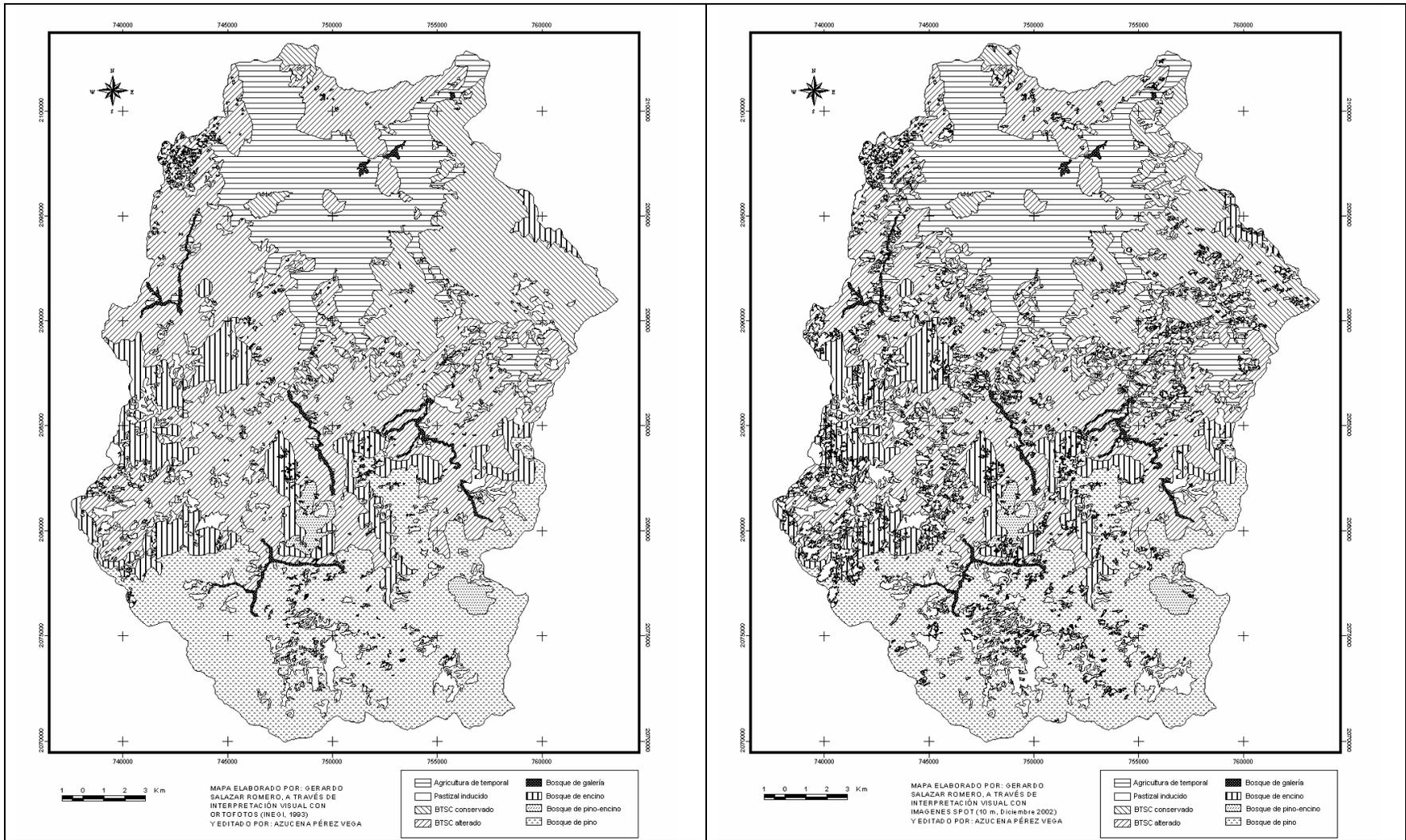
Elaboración de los mapas de vegetación y uso del suelo de 1993 y 2003

La cartografía de las diferentes cubiertas vegetales en la microcuenca de San José de Chila estuvo representada por 8 categorías (Fig. 3 y 4). Según la información de 1993 los BTSC alterados, constituían la cubierta con mayor superficie con casi 34%; seguida por el Bosque de Pino con 22% y por el

Integración de los atributos relieve, litología y suelos y la elaboración de un modelo espacio temporal de la distribución y de la dinámica de un bosque tropical seco caducifolio

BTSC conservado con 12.3%; la suma del BTSC conservado y alterado constituye el 46.3% de la cubierta vegetal en la microcuenca, representando así, la cubierta más importante en cuanto a extensión. Otra cubierta vegetal con significativa representación fue la agricultura de temporal casi con un 15%. Por último las cubiertas restantes sólo representaron menos del 10%, incluidos los pastizales inducidos con un 6.3% (Fig. 4, 5 y Tabla 1).

Para la elaboración de los mapas antes descritos se consideró como área mínima mapeable 2500 m², los cuales equivalen a un cuarto de hectárea, esto fue determinado tomando en cuenta la resolución más gruesa de los insumos utilizados (imagen SPOT), la cual cuenta con 10 m de resolución, considerando que es factible delimitar como unidad más pequeña en el mapa un objeto definido por un grupo de cinco por cinco pixeles (Foster, 1993).



Figuras 4 y 5 - Mapas de la cubierta vegetal en la microcuenca de San José de Chila para los años 1993 y 2002, elaborados a partir de ortofotos de fotografías aéreas e imágenes de satélite SPOT respectivamente.

Elaboración del mapa de distribución potencial de las asociaciones de BTSC

Como se mencionó en la metodología para realizar procesos en lógica difusa se requiere dar valores de pertenencia a los elementos a evaluar, por ello fue necesario determinar los valores de pertenencia a cada una de las asociaciones de diferentes tipos de roca, lo que equivale a evaluar la posibilidad de encontrar cada comunidad en cada uno de los tipos de roca. Para ello se realizó la suma de los porcentajes de cobertura de las especies diagnósticas de cada una de las asociaciones en los diferentes tipos de roca, presentando los siguientes resultados:

Tabla 2 - Valores de pertenencia de los tipos de roca para representar el comportamiento de la función de pertenencia.

	ASOCIACIÓN A	ASOCIACIÓN B	ASOCIACIÓN C	ASOCIACIÓN D
GRANITO	1	0	0.2	0
TOBA ÁCIDA	0	1	0.6	0
ANDESITA	0	0.6	0.6	0.2
ESQUISTO	0	0.3	1	0.2
TOBA ÁCIDA BRECHA VOLCÁNICA	0	0.2	0	1
ARENISCA CONGLOMERADO	0	0	0.2	0

En el caso de la elevación, que es una variable continua, el análisis del porcentaje de cobertura de las especies diagnósticas en función de la elevación permitió seleccionar la mejor función para representar la función de pertenencia. Se utilizaron dos funciones sigmoideas para las asociaciones B

y C, siendo simétrica en el caso de B y decreciente para C; y la segunda función fue J-Shape para las asociaciones A y D, siendo simétrica para A y decreciente en la asociación D.

A continuación se presentan dos gráficas que ejemplifican la obtención de la función de pertenencia con base en el análisis de la relación entre la suma del porcentaje de cobertura y la altitud para los casos de las asociaciones A y D (Figuras 6 y 7).

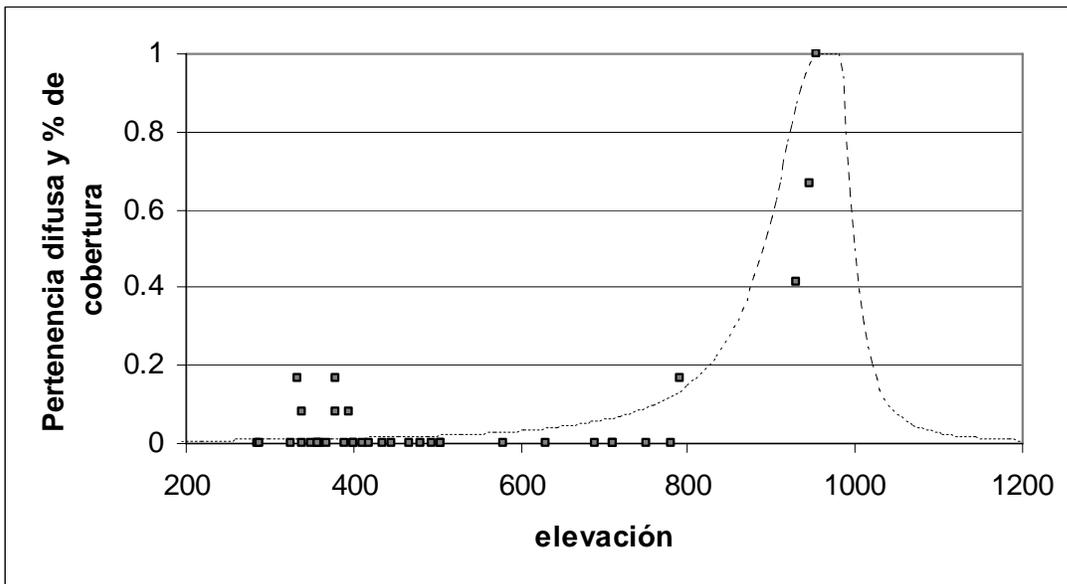


Figura 6 - Asociación A J-shape simétrica correspondiente a la asociación A

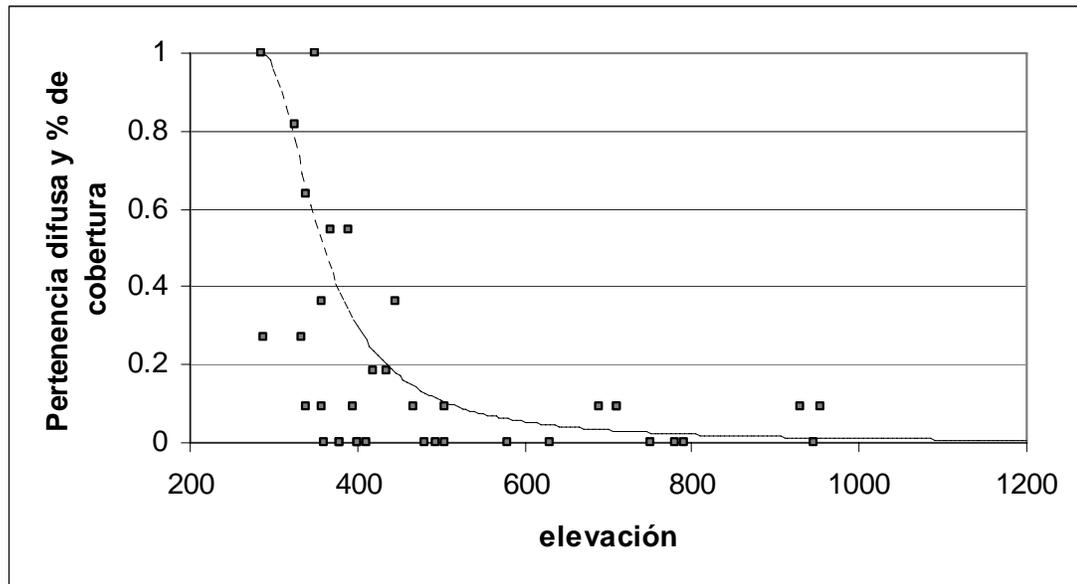


Figura 7 - Asociación D J-shape decreciente correspondiente a la asociación D

La asignación de los valores de pertenencia para la información litológica y altitudinal hizo posible elaborar los mapas difusos expresando la posibilidad de encontrar cada una de las cuatro asociaciones tomando en cuenta estos criterios: Un ejemplo de ello se muestra en la figura 8 a y b que representa los mapas difusos correspondientes a la asociación D.

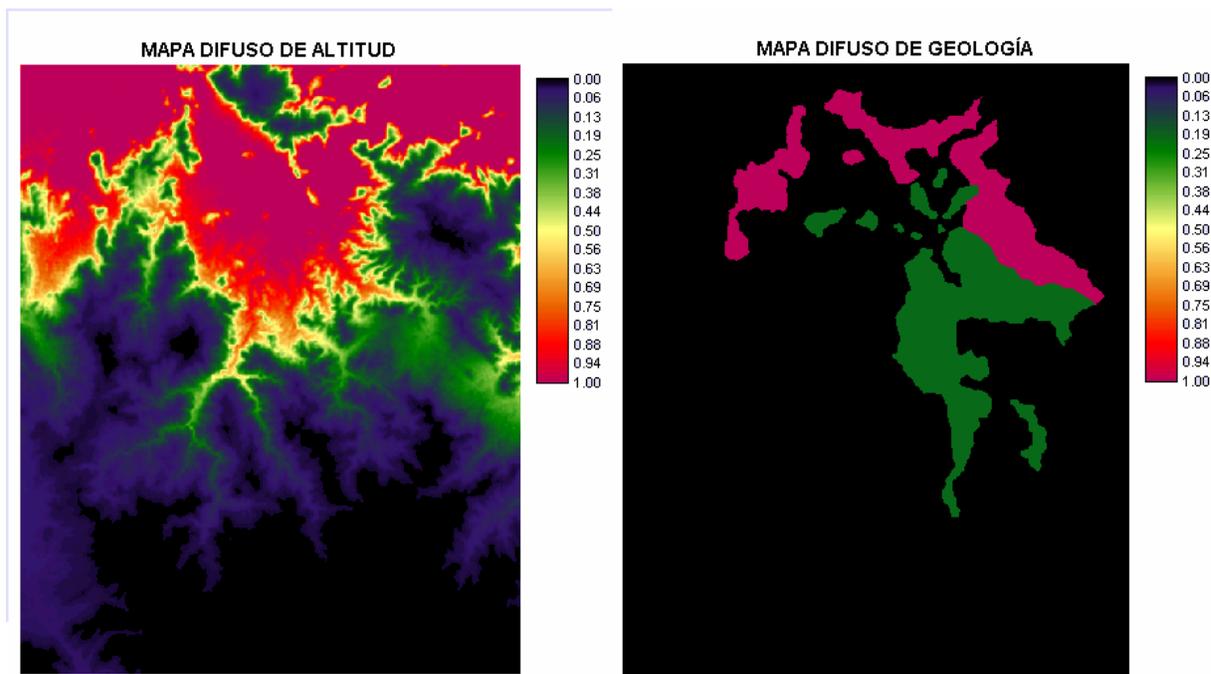


Figura 8 a y b - Mapa difusos de pertenencia de la altitud y la geología a la asociación D del BTSC donde los valores más altos de pertenencia a esta asociación aparecen con el valor 1.00 (tono rosa fiusha).

La obtención de los datos difusos de litología y altitud para cada una de las asociaciones, permitió generar posteriormente el mapa potencial mediante el operador AND para cada una de las asociaciones (Figura 9). Donde los valores más altos de pertenencia a la asociación D, aparecen en rosa fiusha en la parte norte de la microcuenca de San José de Chila.

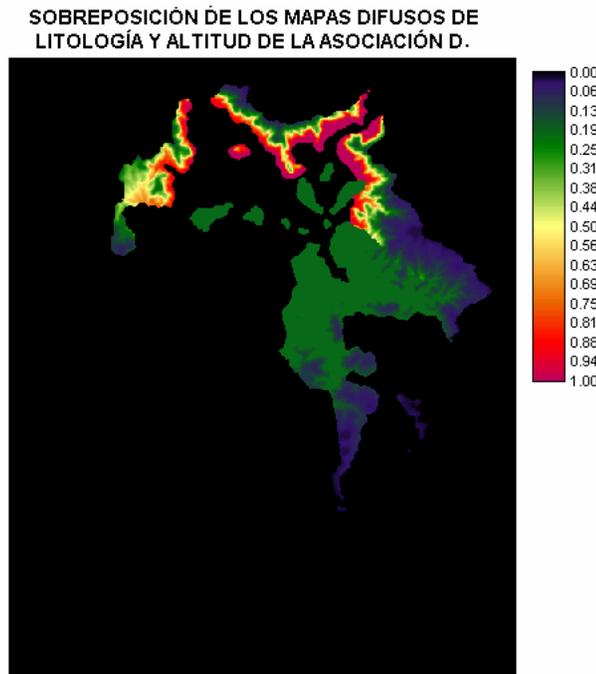


Figura 9 - Mapa resultado de la sobreposición de los mapas difusos de litología y altitud de la asociación D.

Finalmente el proceso de defuzificación dio como resultado el mapa de la distribución potencial de la cubierta del BTSC en la microcuenca de estudio, donde se logró representar espacialmente la distribución de las cuatro asociaciones en la zona de estudio (Figura 10). El mapa muestra de forma clara las áreas donde no existe BTSC, dichas zonas corresponden a otros tipos de vegetación como los son: El Bosque de encino, pino-encino y pino los cuales se localizan en las partes más altas de la microcuenca, así como también cubiertas vegetales de tipo antrópico las cuales se ubican en la zonas de planicies, sitios donde quizá el BTSC prístino tuvo presencia pero actualmente no queda ningún remanente, por ello aparecen ahora sin vegetación de BTSC.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

En el mapa la asociación con mayor representación en la zona de estudio es B, seguida de C, D y por último A. Está última se ubica en la porción más alta mientras D en la más baja.

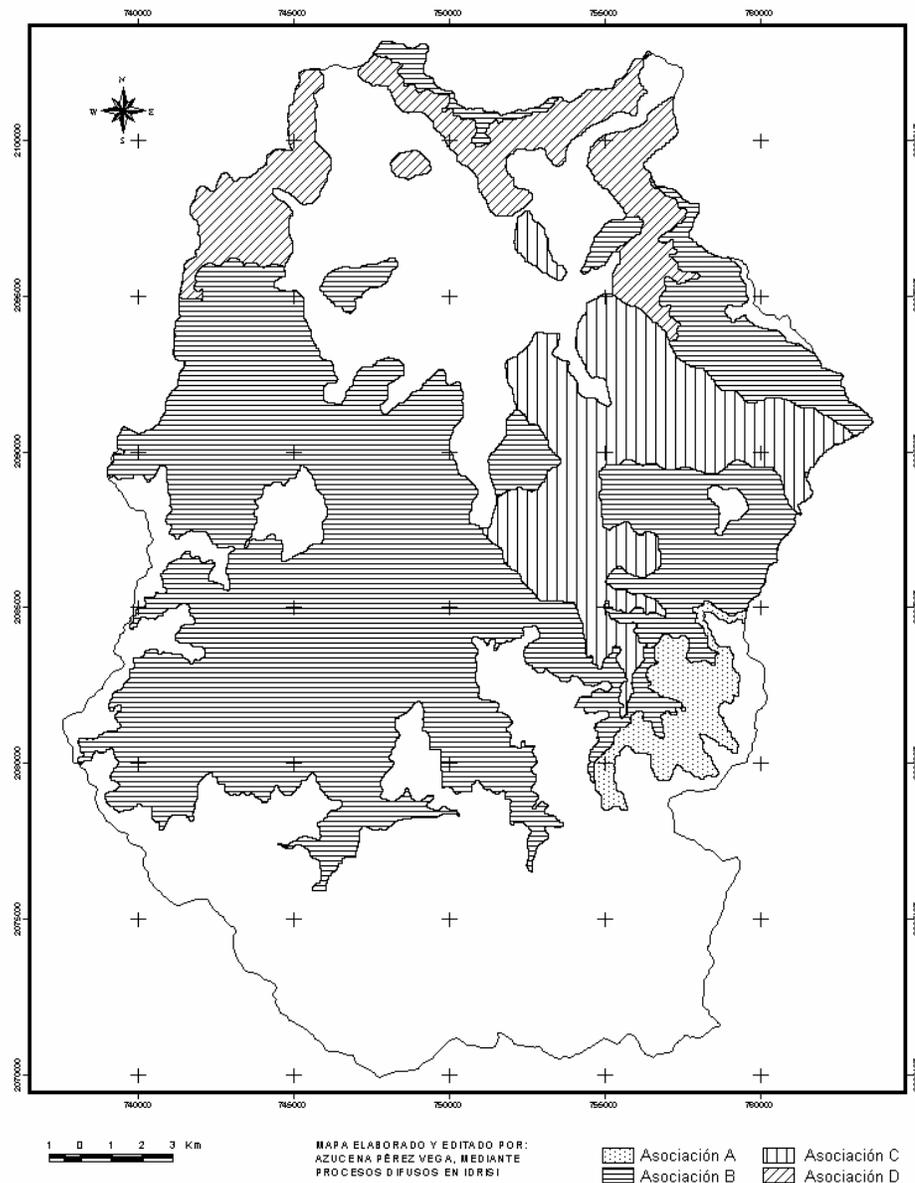


Figura 10 - Modelo espacial de distribución de las asociaciones de vegetación potencial en el BTSC derivados a través de métodos de lógica difusa.

Mejoramiento del mapa de cubierta vegetal y uso del suelo 1993 y 2003

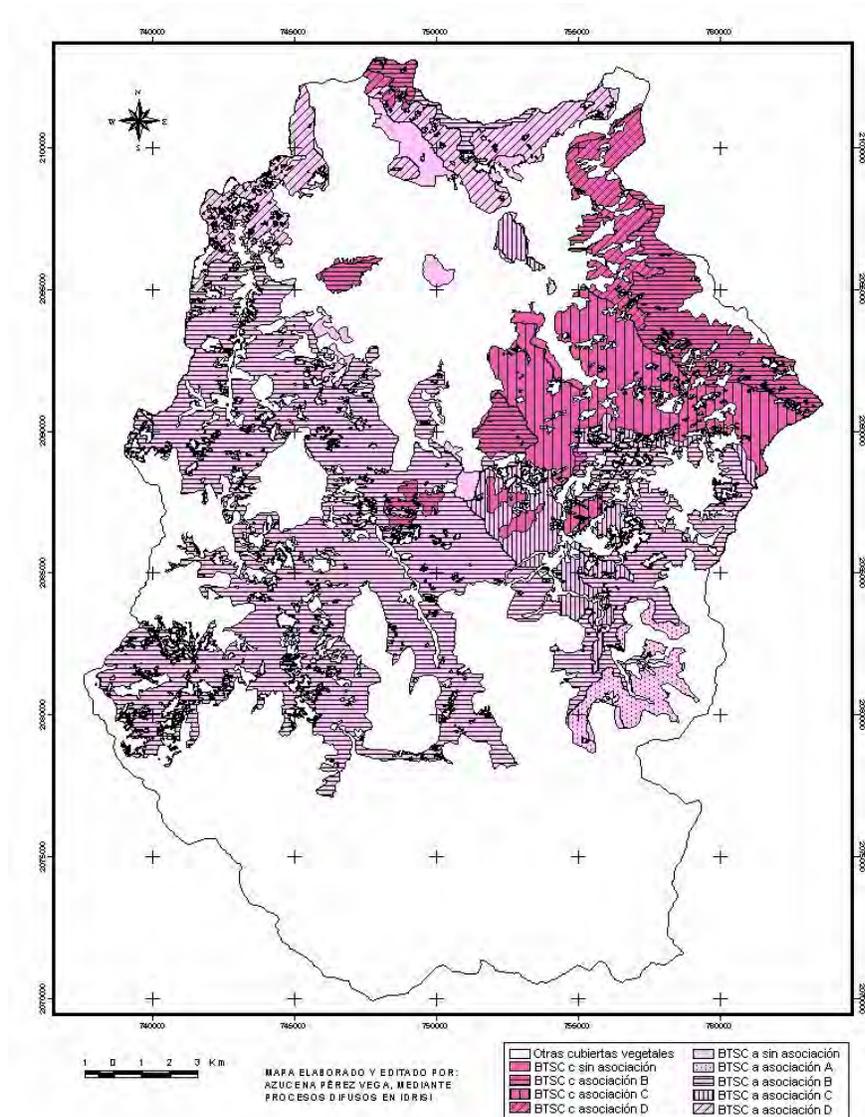


Figura 11 - Mapa mejorado a través de la adición de la información resultante de los procesos difusos en el BTSC en el mapa de cubierta de uso del suelo y vegetación de 1993, las letras minúsculas “c” y “a” corresponden a BTSC “c” conservado y “a” alterado.

El mejoramiento del mapa de la cubierta vegetal fue realizado para la comunidad del BTSC, donde se agregó la distribución de las cuatro asociaciones producto de los procesos difusos; quedando su representación

espacial como se muestra en la figura 11 para ambos estados de conservación del BTSC (conservado y alterado). En la figura 11 se aprecia que es el BTSC alterado de la asociación B que representa la mayor superficie de BTSC en la microcuenca de estudio, solo otra porción de esta asociación se encuentra en buen estado de conservación, ya que se suscribe a una de las partes más agrestes (porción noreste) de la zona de estudio. También es posible observar que la mayor parte del BTSC de la asociación C presenta un buen estado de conservación a pesar de encontrarse en laderas con pendientes suaves. Para el caso de superficies correspondientes a las asociaciones A y B en su totalidad se encuentran en un estado alterado.

Análisis de los cambios en las asociaciones del BTSC y otras cubiertas vegetales

Observando los porcentajes de la superficie de cambio en las diferentes cubiertas vegetales para los años 1993 y 2002 en la microcuenca de San José de Chila, al parecer éstas no sufrieron modificaciones de manera drástica. Los datos de la tabla 2, muestran que la pérdida más significativa en cuanto a superficie la representó el BTSC alterado con un 3.5% y en contraste las ganancias estuvieron representadas por las superficies de agricultura de temporal y pastizal inducido con un 3.2% y 2.3% respectivamente. El resto de las cubiertas vegetales tanto naturales como antrópicas no presenta porcentajes de cambio importantes (Tabla 2 y Figura 12).

Integración de los atributos relieve, litología y suelos en la dinámica y elaboración de un modelo espacio temporal de la distribución de un bosque tropical seco caducifolio

Tabla 3 - Valores de superficie en ha y en % de las diferentes cubiertas vegetales en la microcuenca de San José de Chila para 1993 y 2002.

CUBIERTA VEGETAL	1993 (ha)	%	2002 (ha)	%	Diferencia de %
A. Temporal	8,397	14.7	10,215	17.9	3.2
B. Galería	486	0.9	475	0.8	- 0.1
B. Encino	4,959	8.7	4,687	8.2	- 0.5
B. Pino	12,682	22.2	12,488	21.9	- 0.3
B. Pino Encino	599	1.0	600	1.1	- 0.1
Pastizal inducido	3,599	6.3	4,939	8.6	2.3
BTSC conservado	7,011	12.3	6,342	11.1	- 1.2
BTSC alterado	19,386	33.9	17,373	30.4	- 3.5
Superficie total	57,119	100%	57,119	100%	

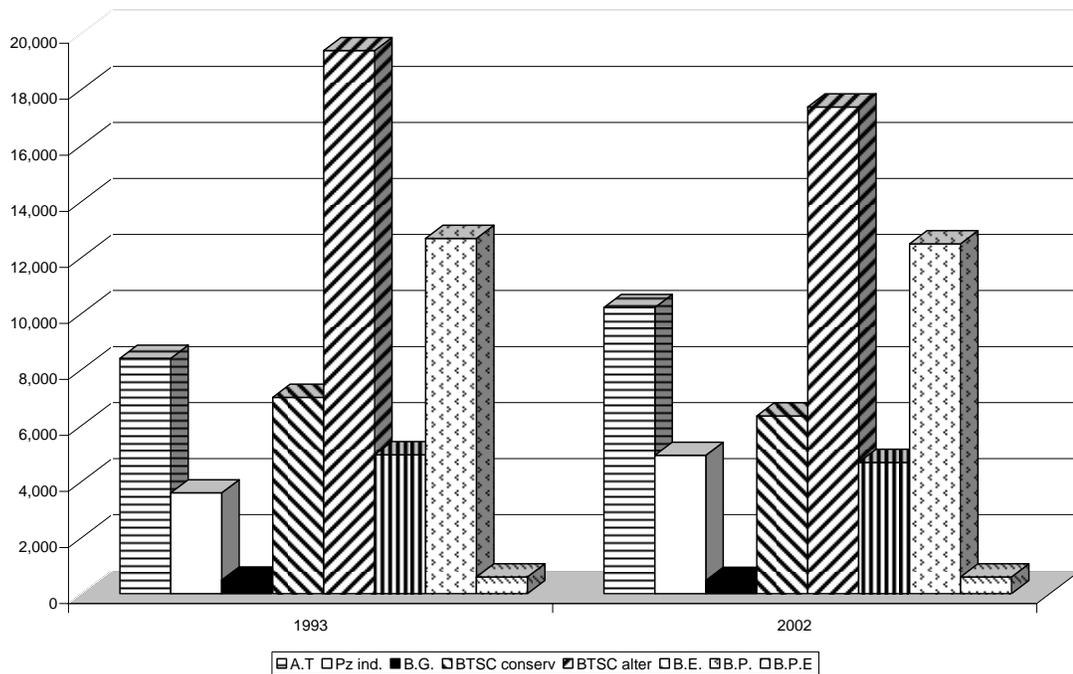


Figura 12 - Representación gráfica de las superficies de los diferentes tipos de cubierta vegetal en la microcuenca de Chila para los 1993 y 2002.

Sin embargo los datos más importantes lo representan las tasas de deforestación, ya que éstas expresan la proporción del área remanente que sufre un cambio anualmente.

La representación de las superficies del pastizal inducido entre 1993 y 2002 (ver figuras 4 y 5), muestra polígonos muy pequeños que parecen no constituir un cambio importante, sin embargo éstos representaron una tasa de cambio en su cubierta de 3.5%. Otra cubierta con importantes cambios fue la agricultura de temporal con una tasa de cambio con un 2.2%. Dichos incrementos en estas cubiertas antrópicas se llevaron a cabo en decremento del BTSC tanto conservado como alterado, siendo el BTSC conservado de la asociación D, quien mostró la tasa de deforestación más alta con -2.3% en comparación con cualquier otro de los BTSC conservados. También hay que mencionar que existen superficies de BTSC conservado B y C que a pesar de encontrarse en laderas de pendiente suavizada se han conservado sin alteración (tabla 3).

Tabla 4 - Superficie, cambio neto y de tasa de deforestación para la cubierta vegetal y uso del suelo en la microcuenca de San José de Chila para los años 1993 y 2002

TIPO DE CUBIERTA VEGETAL	Superficie 1993 (ha)	Superficie 2002 (ha)	Cambio neto en (ha)	Tasa de deforestación (% /año)
A. Temporal	8,397	10,215	1,818	2.2%
B. Galería	486	475	-12	-0.3%
B. Encino	4,959	4,687	-272	-0.6%
B. Pino	12,682	12,488	-194	-0.2%
B. Pino- Encino	599	600	1	0.0%
Pastizal inducido	3,599	4,939	1,340	3.5%
<i>BTSC conservada s/asoc</i>	222	208	-14	-0.7%
<i>BTSC c asoc B</i>	2,377	2,207	-171	-0.8%
<i>BTSC c asoc C</i>	3,249	2,977	-272	-1.0%
<i>BTSC c asoc D</i>	1,162	951	-211	-2.3%
BTSC alterada s/asoc	952	811	-141	-1.8%
BTSC a asoc A	682	686	4	0.1%
BTSC a asoc B	13,900	12,436	-1,465	-1.2%
BTSC a asoc C	1,730	1,502	-228	-1.6%
BTSC a asoc D	2,122	1,938	-183	-1.0%
SUPERFICIE TOTAL	57,119	57,119		

El BTSC alterado alcanzó hasta -1.8% de tasa de deforestación en BTSC en los cuales no fue posible asignarles una asociación vegetal, ya que se localizaban en áreas de piedemonte y pequeños remanentes en la planicie fluvial, también los BTSC alterados de la asociación C mostraron una tasa de deforestación de -1.6% (tabla 3), estos se ubican en laderas con pendiente suave.

Agregando la información tanto del BTSC conservado y alterado para cada una de las cuatro asociaciones, encontramos que es la asociación D, la que sufrió mayor pérdida en comparación con las demás asociaciones con 1.4%, mientras la asociación A fue la menos modificada. La suma total del BTSC para cada una de las fechas arroja una tasa anual de deforestación de 1.2% para la cuenca de San José de Chila (tabla 4).

Tabla 5 - Superficie, cambio neto y de tasa de deforestación para las diferentes asociaciones de BTSC en la microcuenca de San José de Chila para los años 1993 y 2002

Asociación	Superficie 1993 (ha)	Superficie 2002 (ha)	Cambio neto (ha)	Tasa de deforestación (% /año)
BTSC asoc A	682	686	4	0.1
BTSC asoc B	16,278	14,642	-1,636	-1.2
BTSC asoc C	4,979	4,479	-501	-1.2
BTSC asoc D	3,284	2,889	-395	-1.4
TOTAL BTSC	25,223	22,696	-2,527	-1.2

Por su parte las cubiertas naturales de bosque de encino; bosque de pino y bosque de pino-encino no sufrieron cambios considerables en cuanto a la superficie que ocupan porque estos bosques se encuentran muy alterados, son bosques muy abiertos, los cuales se localizan en superficies cumbresales donde los suelos son muy delgados y las fuentes de abastecimiento como cuerpos de agua se encuentran muy distantes, no obstante contar con

caminos de terracería y pequeñas rancherías. Por otro lado existen en la porción alta de la microcuenca de San José de Chila bosques muy cerrados de pino y pino-encino pero estos se encuentran sobre laderas muy pronunciadas, donde no hay caminos de terracería, por lo cual no existe la posibilidad de extraer madera en grandes volúmenes.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este último capítulo permitió integrar los resultados obtenidos entre los atributos, relieve, litología y suelos que determinaron la distribución de la vegetación del BTSC en la microcuenca de San José de Chila, pero desde una perspectiva espacial, designando la importancia de cada una de los atributos para la representación de la distribución de las asociaciones vegetales del BTSC.

La integración de la información 1:1 de la vegetación y de variables ambientales recopiladas en campo para su representación espacial, actualmente es posible debido al avance de insumos con mayor precisión existen diferentes resoluciones y al uso de información temática representada cartográficamente.

Fue posible mejorar la representación cartográfica de la cubierta vegetal y de uso del suelo a través de dos procesos. 1. La combinación de la utilización de técnicas de interpretación visual tradicional y el uso del paquete de Sistemas de Información Geográfica (GeoVis) mismo que facilitó la digitalización en pantalla de la información y 2. Mediante la utilización de metodologías nuevas que utilizan procesos inteligentes (procesos difusos), los cuales agregaron información adicional, que permitió obtener un mapa con mayor detalle de la cubierta vegetal específicamente del BTSC.

La ponderación de las variables se basa en los resultados del análisis estadístico de los relevés (expuestos en el capítulo IV) ya que, por una parte, la pertenencia de un sitio a una asociación depende del porcentaje de cobertura de sus especies diagnósticas y, por otra parte, este análisis permitió evaluar las variables medio-ambientales que tienen más influencia sobre la distribución de estas cuatro asociaciones. Sin embargo, no fue posible utilizar todas las variables arrojadas por el análisis estadístico previo porque, para el modelado espacial, se necesita tener una expresión cartográfica de dichas variables. Por esta razón no se utilizaron variables como profundidad del suelo (variables con correlación importante pero no se contó con información de mapas que representaran espacialmente de manera continua dichos atributos) en el modelado.

El manejo de la información espacial con un enfoque difuso permitió expresar el efecto gradual de ciertas variables medio-ambientales sobre la vegetación. Por ejemplo, ciertas especies presentan un rango altitudinal óptimo pero pueden encontrar fuera de este rango, aunque sea de forma marginal. El modelado difuso del efecto de una variable es mucho más verosímil que el enfoque Booleano que impone límites bruscos en el espacio. Finalmente el enfoque difuso permitió también manejar la interacción entre variables. En este estudio, se utilizó el operador AND que equivale a considerar que todas las situaciones favorables deben ser reunidas para que las condiciones generales sean favorables al desarrollo de una asociación vegetal.

Los métodos difusos antes mencionados hicieron posible la representación de la distribución espacial y potencial de las cuatro asociaciones vegetales del BTSC determinadas a través de métodos fitosociológicos. Por lo que se concluye que los métodos difusos son una herramienta importante e innovadora en la modelización de distribución de la vegetación del BTSC.

La representación de la cubierta vegetal del BTSC en la cuenca de San José de Chila mostró que esta cubierta es la más importante en cuanto a extensión y que la mayor superficie de ella se encuentra en estado de alteración. Las áreas mejor conservadas del BTSC corresponden a sitios con laderas escarpadas donde no existen vías de acceso pero por otro lado también se presenta BTSC conservado sobre superficies de laderas con pendientes suaves, lo cual puede ser consecuencia del abandono de la tierra, ya que los procesos de migración de la población a los Estados Unidos son muy frecuentes en la población del lugar, este tipo de procesos se encuentran documentados en un trabajo en la zona del lago de Cuitzeo (López et al., 2006).

La cubierta actual de BTSC es amenazada por los cultivos de pastizal inducido, los cuales se presentan principalmente en la porción media de la cuenca.

Según datos de tasa de deforestación reportados por otros autores, las tasas de deforestación obtenidas en este estudio son relativamente altas. En el trabajo de Mas et al., (2005) consideran una tasa de cambio para el BTSC y subcaducifolio para el periodo 1976-2000 en un 0.65% por año en el estado de Michoacán. Mientras Trejo (2000) para el periodo entre 1973-1989 en un estudio del BTSC en el estado de Morelos calculó un rango de deforestación anual de 1.4%. Mientras Masera et al. (1997) estimaron una tasa de deforestación anual de 2.02 % para todo el país.

Los datos citados anteriormente muestran que en la zona de estudio se requiere de llevar a cabo un mayor número de trabajos de investigación de estos ecosistemas ya que es urgente realizar un manejo de restauración y conservación de la cubierta vegetal, pues esta zona forma parte del BTSC con mayor diversidad del país, pero al mismo tiempo es uno de los BTSC menos estudiado y en el que los procesos de deforestación en las últimas

dos décadas están conduciendo a un deterioro del cual quizá nunca se tenga retorno.

Finalmente, se puede mencionar que este tipo de modelos puede también desarrollarse para predecir el riesgo de deforestación. En vez de relacionar y mapear la posibilidad de encontrar cierta asociación vegetal tomando en cuenta variables medioambientales especializadas, es posible enfocar un modelo similar en asociar posibilidad de deforestación con variables especializadas que describen variables bio-físicas del medio ambiente (tipo de vegetación, suelo, pendiente) y socio-económicas (densidad de población, tenencia de la tierra, accesibilidad...). Combinando ambos modelos, es entonces posible identificar las asociaciones o las áreas más propensas a ser deforestadas en el futuro.

Los métodos de modelado espacial establecen una línea base de las condiciones de los recursos naturales en su dinámica espacio temporal, dicha información crea las bases para apoyar tareas de planificación, fundamentar acciones de conservación y manejo. Así como también puede predecir escenarios futuros de la distribución de la vegetación ante un cambio global, representando las zonas de refugios naturales para los diferentes comunidades vegetales, que en el caso del BTSC se pronostica una ampliación de su extensión resultado del calentamiento global del planeta (Leemans, 1999).

BIBLIOGRAFÍA

American Society of Photogrammetry. 1952. Manual of Photogrammetry: Washington, 2ªed.

Clark, M.L.; Roberts, D.A. y Clark, D.B. 2005. Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scale, *Remote Sensing of Environment*, 96, 375-398.

Duivenvoorden, J.F. y Lips, J.M. 1995. A land-ecological study of soils, vegetation, and plant diversity in Colombian Amazonia. Tropenbos Foundation. Series 12. Netherlands.

FAO, 1996. Forest resources assessment 1990, Survey of tropical forest cover and study of change processes. FAO Forestry Paper n° 130, 152 p.

Forster B.C., 1993, Satellite Remote Sensing for Land Information in Developing Countries, Geocarto International, Vol. 8, n° 1, pp. 5-15.

Garduño, V.H., Corona, P., Israde, I., Mennella, L., Arreygue, E., Bigioggero, B. y Chiesa, S. 1999. Carta Geológica del Estado de Michoacán, Escala 1:250,000. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Departamento de Geología y Mineralogía. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo Morelia, Michoacán. México. 111pp.

Guisan A. y Zimmermann N., 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135. 147-186.

Leemans, R. 1999. Possible changes in natural vegetation patterns due to global warming. International Institute of Applied Systems analysis, Laxenburg, Austria.

López E., G. Bocco, M. Mendoza, A. Velázquez and R. Aguirre. 2006. Peasant emigration and land-use change at the watershed level. A GIS-based approach in Central Mexico. *Agricultural Systems* 90: 62-78 .

Nichols WF, Killinbeck KT and August PV. 1998. The influence of geomorphology heterogeneity on biodiversity. A landscape perspective. *Conservation Biology* 2:371-379.

Mas, J.F. y Pérez-Vega, A. 2004. Mejoramiento de la clasificación de imágenes de satélite con base en la incorporación de variables topográficas. III Seminario Latinoamericano de Geografía Física. Abril – Mayo. Puerto Vallarta. México. 133p.

Mas, J.F., Velázquez A. y Fernández T. 2005. “Monitoreo de los cambios de cobertura del suelo en Michoacán”. La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Gobierno del Estado de Michoacán. Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 266 p.

Masera, O. R., Ordoñez, M.J., Dirzo, R. 1997. Carbon emissions from Mexican forest: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35, 256-295.

Palacio-Prieto, J.L., Bocco, G., Velázquez, A., Mas, J.F., Takaki-Takaki, A., Victoria, A., Luna-González, L., Gómez-Rodríguez, G., López-García, J., Palma, M., Trejo-Velázquez, I., Peralta, A., Prado-Molina, J., Rodríguez, A., Mayorga-Saucedo, & R., González-Medrano, F. 2000. La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Nacional Forestal 2000. *Investigaciones Geográficas (UNAM)* 43:183-203.

Pedrotti, F. 2004. *Cartografía Geobotánica*. Pitagora Editrice. SELCA. Bologna. 236.

Trejo, I. 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation* 94: 133-142.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente trabajo se relacionaron atributos del relieve (escala regional), litología y suelo (escala local) con la distribución de la vegetación, primero a pequeña escala para todo el territorio nacional y posteriormente, a una escala local en una microcuenca cubierta de Bosque Tropical Seco Caducifolio (BTSC).

En el presente estudio se buscó analizar la composición y distribución espacial de la vegetación a través de herramientas analíticas de vanguardia, tales como los Modelos Digitales de Elevación (MDE), para el estudio de las formas del territorio (Stocks y Heywood, 1994; Franklin, 1995; Burnett et al., 1998; Wilson y Gallant, 2000; Wheatley et al., 2000). De igual forma, se utilizaron herramientas metodológicas de corte fitosociológico para el análisis del BTSC, ya que este bosque es uno de los más diversos en los trópicos y se caracteriza por tener el 40% de especies endémicas (Lott, 1993; Gentry, 1995), una ausencia de especies dominantes (Trejo y Dirzo, 2000), y una expresión fisonómica contrastante entre las dos épocas marcadas del año (secas y lluvias). El estudio es importante pues se ha documentado que los BTSC son uno de los ecosistemas en México más amenazados ante los

procesos de deforestación (Robichaux y Yerman, 2000; Trejo y Dirzo, 2000 y Velázquez et al., 2003).

Los resultados en la aproximación a escala pequeña (para todo el país), mostraron que la relación entre los atributos del relieve y la diversidad de tipos de vegetación, presentaron una alta correlación, lo cual permitió predecir la diversidad de vegetación con una precisión satisfactoria en más del 74% de la superficie modelada. Los atributos que representaron mayor correlación con los patrones de diversidad fueron el rango de elevación, la pendiente y la elevación promedio, no siendo así para los atributos de rugosidad y diversidad de exposición. Es importante reconocer que la diversidad de los tipos de vegetación no puede explicarse solamente con atributos topográficos. Sin embargo, los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran que los rasgos topográficos juegan un papel fundamental en la diversidad de tipos de vegetación a escala regional.

La adecuada representación del relieve a través del uso de MDE a escala local, requirió de la evaluación de los errores inherentes a los procesos de interpolación. La evaluación de cuatro programas (ARC/INFO, NEWMIEL, IDRISI e ILWIS), arrojó que el rango de error con respecto al MDE de referencia fue de 7.3 m a 11.3 m. El programa que presentó menor error fue ARC/INFO, seguido de NEWMIEL, y la resolución óptima varió desde 20

hasta 30 m, para información obtenida con curvas de nivel a cada 50 m. Las zonas de planicies son las áreas donde el error fue mayor, en comparación con otras formas del relieve. Es importante considerar dicha condición en trabajos de planificación del uso del territorio, ya que las planicies juegan un papel primordial en el desarrollo de las actividades económicas.

El estudio de la relación entre los atributos del relieve, el suelo y la vegetación en la escala local de un BTSC mediante métodos fitosociológicos, mostró la importancia de utilizar dicho método en este ecosistema, ya que fue posible determinar cuatro asociaciones vegetales, así como las especies diagnósticas, destacando que los atributos que mostraron mayor influencia en la distribución de las asociaciones fueron la altitud, la litología, la profundidad del suelo y el porcentaje de arena. Sin embargo, atributos como la curvatura en planta, la pendiente, la exposición, la posición de la ladera, así como otros atributos de tipo antrópico, como el uso del suelo y el estado de conservación de la vegetación, no permiten explicar la distribución de las asociaciones.

El último capítulo tiene un carácter integral de la información sobre las asociaciones vegetales del BTSC en la zona de estudio, representando espacialmente: la distribución geográfica, la dinámica espacio-temporal, la predicción potencial, el deterioro y transformación que han sufrido dichas

asociaciones (periodo 1993-2002). Esto, con la finalidad de encaminar esfuerzos para el desarrollo de proyectos de manejo, conservación y restauración del BTSC. El proceso de integración permitió construir el difícil vínculo entre la información obtenida en campo a escala 1:1 y su posterior representación espacial. Este vínculo fue posible gracias a la aplicación de “métodos difusos” de modelado en la representación espacial del BTSC.

A continuación se discutirán las ventajas y desventajas del enfoque fitosociológico, así como la utilización de atributos del relieve a través del uso de Modelos Digitales de Elevación, para representar variables ambientales y del uso de un enfoque geográfico para el modelado de la distribución de las asociaciones vegetales del BTSC. Finalmente se analizarán las posibles aplicaciones futuras del enfoque y técnicas utilizadas en este trabajo.

Ventajas del uso de variables de relieve derivadas de un MDE

Sin duda, la utilización de atributos del relieve obtenidos a través de Modelos Digitales de Elevación para comprender la distribución de la vegetación, es un tema novedoso y de gran utilidad. En años recientes, los avances computacionales, el desarrollo de paquetes estadísticos y el mejoramiento de la calidad de los MDE, han motivado la realización de numerosos trabajos. Aquellos que relacionan los aspectos del medio ambiente (a través del relieve) con la riqueza de especies o la distribución de comunidades vegetales, se han dado en diferentes partes del mundo, pero enfocados

principalmente en países europeos y en Estados Unidos, lo cual ubica dichos estudios en ambientes templados (Hoers et al., 2002; Nichols et al., 1998; Raupach y Finiggan, 1997). El análisis de un MDE permite generar índices que substituyen variables difíciles o costosas de medir (e.g. temperatura, humedad del suelo, insolación, índice de la fuerza de las corrientes, etc.). Los MDE cuentan con una gran disponibilidad, ya que recientemente el uso de datos de percepción remota ha permitido su elaboración para toda la superficie terrestre. A excepción de los de muy alta precisión, los MDE tienen bajo costo, y se encuentran en constante mejoramiento en cuanto a la calidad/resolución.

La información topográfica actualmente se encuentra disponible en diferentes resoluciones para la mayor parte del mundo. Esto es un aspecto crucial en países tropicales donde se presenta una alta biodiversidad pero frecuentemente se carece de bases de datos confiables y actualizados sobre inventarios de recursos naturales. Por ello, el uso de atributos del relieve derivados de un MDE es fundamental. Contar con un MDE de buena calidad constituye un insumo fundamental en los estudios ambientales sobre todo en países como México, que cuenta con un 70% de su superficie con relieve montañoso y ocupa el quinto lugar a nivel mundial en cuanto a la diversidad que alberga.

Limitaciones del uso de variables de relieve derivadas de un MDE

Como se mencionó anteriormente, es posible contar actualmente con información de gran precisión en los MDE obtenida a través de sofisticados sensores (radar y láser). Sin embargo, no siempre se encuentra disponible por el costo que implica. La información altitudinal obtenida a través de procesos de interpolación con base en MDE de baja resolución acarrea errores dependiendo de la calidad de las curvas de nivel, del tipo de algoritmo y de la resolución utilizada. Más aún, los errores de los MDE tienen sesgos. En este estudio se mostró que las zonas de planicies son las áreas donde el error es mayor en comparación con otras formas del relieve, por lo que los algoritmos de interpolación deben ser mejorados en este sentido.

Diversos trabajos, incluyendo el presente estudio, han documentado la importancia de contar con una resolución idónea, estableciendo que una resolución inadecuada genera un MDE con un mayor error. Es importante notar que este error se incrementa cuando se calculan variables más complejas como, por ejemplo, el área de contribución de una cuenca (Guisan y Zimmerman, 2000; Wechsler y Kroll, 2006; Bolstad y Stowe, 1994). Wilson y Gallant (2000) establecen que los valores del error medio cuadrático (RMSE) de la pendiente, exposición y curvatura en planta y perfil son directamente proporcionales a los RMSE de la elevación y que estos últimos se incrementan cuando decrece la resolución. Los RMSE de curvatura en

planta y perfil son más sensibles a cambios en la resolución del MDE que para atributos tales como la pendiente y la exposición. Por último los RMSE de todos los tipos de atributos del relieve aumentan en áreas planas.

Se podría esperar que la utilización de MDE de alta resolución, como los obtenidos con tecnología Lidar, permite evaluar atributos del relieve con mayor exactitud (Webster et al., 2006) y, por lo tanto, contar con información más idónea para establecer su relación con la distribución de la vegetación. Sin embargo, Lausarier (2003) reportó que el uso de MDE de alta precisión para generar atributos como curvatura en planta y perfil en los Alpes Suizos, no permitió determinar una relación más estrecha entre atributos del relieve y distribución de la vegetación. No obstante, es probable que bajo otras condiciones, la utilización de atributos del relieve obtenidos con base en un MDE de alta resolución permita mejorar el modelado de la vegetación, por lo cual es importante realizar más estudios de esta índole y en otros ambientes.

Por todo lo dicho anteriormente, es importante reconocer que el uso de MDE debe estar acompañado de una valoración previa en cuanto a su resolución y a sus posibles errores. Esto debe hacerse tanto de forma automatizada, como con base en información de atributos que puedan ser verificados en campo. Sólo mediante una adecuada atención a estos errores se puede contar con un MDE de calidad.

Ventajas del enfoque fitosociológico.

El método fitosociológico constituye una innovación en comunidades de BTSC, ya que es un método que fue llevado a cabo para el caso de México principalmente en vegetación templada (Velázquez, 1994; Almeida et al., 1994; Islebe y Velázquez 1994; Islebe et al., 2003; Giménez y Ramírez, 2003). El estudio de Peinado et al. (1994) incluyó un área de BTSC en la península de Baja California, donde se obtuvo la información de las comunidades vegetales sin relacionarse con variables ambientales. Otros ejemplos de estudios fitosociológicos que han demostrado que existe relación importante entre las variables ambientales y la distribución espacial de la vegetación, son los llevados a cabo en bosques tropicales húmedos de diferentes partes del mundo (Richards, 1952; Greigs-Smith, 1971; Lawson et al., 1970; Austin et al., 1972; Hall y Swaine, 1976; Nerbery y Proctor, 1984; Gartlan et al., 1986; Baillie et al., 1987, 1989; Duivenvoorden y Lips, 1995). Esto, a pesar de que anteriormente se creía en una distribución aleatoria de las especies en dicha comunidad vegetal.

La determinación de asociaciones vegetales en el BTSC a través del método fitosociológico resultó una aportación de utilidad, ya que el BTSC es una comunidad con alta diversidad y poca dominancia, condición que podría parecer complicada para lograr establecer patrones de distribución de asociaciones dentro de esta comunidad. Sin embargo diferentes trabajos

llevados a cabo en ambientes tropicales, aunque no de corte fitosociológico, han establecido relaciones entre la distribución de las especies y variables ambientales, tales como la precipitación, la altitud, la litología, y la características físicas y químicas de los suelos (Austin et al., 1983; Gentry, 1988; Davis y Goetz, 1990; Oliveira-Filho et al., 1994 y 1998; Pyke et al., 2001; Del Bon Espirilito-Santo, 2002; Villers et al., 2003 y Dalberg et al., 2006).

Algunos autores han mencionado que en regiones de clima árido, las diferencias en las características topográficas, del sustrato geológico y del suelo ejercen mayor influencia sobre la distribución de la vegetación, incluso que la misma precipitación pluvial. Una clara muestra de ello son las disimilitudes en la cubierta vegetal entre áreas de suelo profundo y áreas contiguas con suelos someros y pedregosos. En estas últimas se desarrolla una vegetación que presenta, por lo general, la biomasa, el número de especies y las formas biológicas con una mayor diversidad y complejidad (Shreve, 1994a, 1951; González., 2003).

El método fitosociológico aplicado al BTSC en la zona de estudio, fue ejemplo de lo mencionado en el párrafo anterior, pues dos asociaciones (B y C) presentaron condiciones climáticas y altitudinales muy similares, pero su establecimiento fue determinado por el contenido de arcilla-arena derivado

de la diferencia litológica, las especies mostraron mayor presencia y vigorosidad a la asociación que pertenecían.

Por otro lado, la disponibilidad de humedad es otro factor que también determina la composición florística y la estructura de las asociaciones, así como su posición a lo largo de un gradiente altitudinal. Esto se observa en la zona de estudio donde la baja disponibilidad de humedad es consecuencia de la barrera orográfica que ejerce el relieve y modifica el clima de forma regional, impidiendo el paso de masas de aire húmedo del Océano Pacífico. Es por ello que especies que se encuentran en la ladera de barlovento a nivel del mar, se presentan en laderas de sotavento de forma importante sólo por arriba de los 600 m.s.n.m. Sin embargo, esta misma condición del relieve afecta de forma local, la mayor o menor disponibilidad de humedad, ya que al ascender altitudinalmente, la temperatura disminuye y los procesos de evapotranspiración se atenúan, reduciendo la pérdida de la humedad. Es por ello que la composición florística y estructural de las asociaciones A (> 800 m.s.n.m) y D (<400 m.s.n.m.) son totalmente distintas, al grado de que las especies diagnósticas que las constituyen son exclusivas para cada asociación a la que pertenecen, y la estructura, en cuanto a la altura del dosel de los árboles, también es contrastante entre ambas asociaciones (20 y 10 m, respectivamente).

No obstante que el método fitosociológico, por sí mismo, no lleva implícito la expresión de la distribución espacial de las asociaciones del BTSC (Pedrotti, 2004), en este trabajo se logra dicha representación espacial, mediante la utilización de SIG, MDE y variables temáticas especializadas para generar modelos de distribución de la vegetación potencial. Esto representa un importante avance en el conocimiento del BTSC de la zona de estudio.

Limitaciones del enfoque fitosociológico.

Como una limitación del enfoque fitosociológico se puede mencionar la dificultad en la obtención de la información, tanto en la colecta en el campo, como en la identificación del material. Ambas cosas requieren un trabajo intenso y, por consecuencia, una importante experiencia en este tipo de estudios. Sin embargo, el trabajo antes citado es necesario para cualquier estudio de vegetación detallado. Además, en el enfoque fitosociológico utilizado en el presente estudio, la medición de diámetro a la altura del pecho para cada individuo fue sustituida por el porcentaje de cobertura correspondiente a cada especie, lo cual resulta más rápido de evaluar.

Por otro lado, la selección de los sitios de muestreo sin conocimiento previo de la zona de estudio puede resultar un ejercicio subjetivo, ya que el éxito de una determinación adecuada de las comunidades vegetales depende de la experiencia del equipo de trabajo. Sin embargo, la falta de esta experiencia

previa es una crítica general de la mayoría de los estudios de vegetación, y no exclusivamente del método fitosociológico.

Finalmente, un inconveniente relacionado con este enfoque es la falta de estudios de corte fitosociológico en México, y en especial en el BTSC, por lo cual se carece de elementos de comparación.

La representación geográfica (enfoque de modelado con SIG)

La representación espacial de los datos de muestreo genera una disyuntiva entre obtener información de campo, recopilada en una superficie muy reducida (típicamente unos cientos de metros cuadrados) a escala uno a uno, o buscar datos mucho más generales disponibles para todo el territorio. Este problema se encuentra en aplicaciones muy prácticas, como por ejemplo, el cálculo del volumen maderable en los inventarios forestales, los cuales se estiman por métodos de interpolación geoestadísticos como los vecinos más cercanos (Franco-López, 2001; Finley et al., 2005). El enfoque de modelado en SIG abre la puerta a la elaboración de productos cartográficos y a aplicaciones prácticas, permitiendo la extrapolación de la información de puntos de muestreo a grandes superficies. El desarrollo de las tecnologías de SIG, sensores remotos y datos digitales relacionados al objeto de estudio, producen nuevas oportunidades para salvar esa disyuntiva (Guerrard et al., 1997).

De igual manera, modelos SIG robustos para la predicción de la vegetación son herramientas importantes en el manejo de la biodiversidad de los bosques. La construcción de los mismos requiere de un entendimiento de los procesos ambientales que controlan la distribución de las especies, lo que permite seleccionar adecuadamente las variables predictoras de dicha distribución (Austin y Meyers, 1996). Sin embargo, es importante mencionar que modelos sencillos pueden representar de manera más realista la distribución de la vegetación que modelos complejos. La limitación de este enfoque reside en la necesidad de tener variables espacializadas, actualizadas y de calidad ya que, al combinar varias capas de información en un SIG, el error presente en cada capa tiende a acumularse en el mapa final, producto de la combinación. Este fenómeno, conocido como “propagación del error” en la literatura especializada es aún poco entendido, ya que depende de la correlación del error en los mapas involucrados. Es por ello que modelos complejos, involucrando un gran número de variables, son más propensos a la propagación del error que modelos sencillos basados en pocas variables. Además, el tema de la evaluación del error cartográfico es aún muy reciente y no existen métodos operativos para tener información espacial sobre el error (sólo se tiene una evaluación global del error de un mapa, con información sobre el error de cada categoría). En México, en particular, las principales fuentes cartográficas no son sometidas a un proceso de evaluación robusto de la fiabilidad (Couturier, 2007).

Síntesis integral del trabajo de tesis

El presente trabajo permite concluir que el uso de MDE a nivel regional presenta una herramienta fundamental en los estudios espaciales de la diversidad de tipos de cubierta vegetal, sobre todo en áreas de montaña. En el presente estudio, se logró predecir con precisión la diversidad de los tipos de vegetación en más del 74% del territorio nacional.

El método fitosociológico permitió la determinación de asociaciones vegetales y de sus especies características en el BTSC, a pesar de la complejidad de dichos ambientes.

Es posible determinar la distribución de las asociaciones vegetales del BTSC a partir del entendimiento de dos escalas: regional y local. A escala regional, los factores climáticos determinan las condiciones para el establecimiento del BTSC (*versus* otras comunidades), las cuales tienen un rango mínimo y máximo de temperatura media anual (18° a 28° C), de precipitación anual (350mm a más de 1500mm) y un rango altitudinal de 0 m.s.n.m hasta 1700 m.s.n.m. (Miranda y Hernández X, 1963; Pennington y Sarukhán, 1968; Rzedowky, 1978; Trejo, 1998). Sin dejar fuera el marco climático regional, la ubicación geográfica de los grandes sistemas montañosos respecto al mar y la dinámica general de la atmósfera, ejercen una influencia fundamental en el establecimiento del BTSC, ya que la interrelación entre estos factores crea

condiciones de disponibilidad de humedad fundamentales para dichas comunidades vegetales.

A escala local, los atributos litológicos, así como las características físicas y químicas del suelo, crean condiciones de hábitat específicas en cuanto a la disponibilidad de humedad y nutrientes, lo que determina el establecimiento de las especies y la creación de asociaciones cuya presencia y desarrollo óptimo dependen de las condiciones que les proporciona un hábitat en particular.

El BTSC es muy complejo, por lo que no es posible modelarlo solamente a través de los atributos del relieve y, por tanto, es necesario considerar tanto aspectos bióticos como abióticos. La aplicación de los MDE en un BTSC no permitió encontrar correlaciones importantes con atributos ligados directamente con el relieve, a excepción del atributo de altitud. Esto es, las variables de posición de ladera, pendiente y curvatura en planta, al parecer no contribuyen en la distribución de las asociaciones vegetales en los BTSC de la zona de estudio. Quizás, esta nula relación se deba a que los muestreos fueron realizados sólo en laderas con pendientes de moderadas a fuertes, donde la acumulación de humedad y desarrollo de suelos profundos no es favorecida. Otro atributo que no mostró una relación importante con la distribución de la vegetación fue la exposición, a pesar de

que el muestreo se realizó en laderas norte y sur. Esta falta de relación puede ser explicada por la posición latitudinal de la zona de estudio, donde el efecto de vertiente es mucho menos importante que en América del Norte o Europa. Así mismo, debido al hecho de que el BTSC tiene un periodo tan prolongado de sequía, sumado a la condición de suelos someros y en pendientes considerables (lo cual no permite una condición retención de humedad), al parecer la exposición no representa un cambio significativo entre ambas laderas, aún en aquellas con poca insolación (laderas al norte).

La utilización de Sistema Información Geográfica, cartas temáticas, métodos estadísticos y métodos difusos constituyen una herramienta indispensable en el mejoramiento y modelado de la distribución de la vegetación. Con ello se logra una adecuada transformación de información escala 1:1 (obtenida en trabajos de campo) a la representación espacial de la misma a diferentes escalas (en función de la calidad de las cartas temáticas y de la densidad de la información de los puntos de muestreo en campo).

La sobreposición de los mapas mejorados de la distribución de la vegetación en dos fechas (1993-2002) permitió reproducir el mapa de cambio de cubierta vegetal y uso del suelo, lo cual mostró la importante transformación que se realiza en los BTSC de la zona de estudio. Se estimó una tasa de deforestación de promedio de 1.2% anual, y tasas del 1.4% para el caso de

la asociación D (*Caesalpinia platyloba* S. Watson, *Erythroxylom rotundifolia* Lunan, *Caesalpinia eriostachys* Benth., *Acacia houghii* (Britton & Rose), *Bursera Coyucensis* Bullock, *Manihot tomatophylla* Standl., *Erythroxylon mexicanum* Kunth y *Gossypium aridum* (Rose & Standl. Ex. Rose) Skovst. Dicha asociación se localiza en las porciones altitudinalmente más bajas y muy cercana a importantes vías de acceso.

El estudio de la composición florística, las variables que determinan el establecimiento y distribución de la vegetación, así como el deterioro espacio-temporal del BTSC en la zona de estudio, aportan conocimientos importantes en una zona donde los estudios de vegetación son prácticamente nulos. Ello representa una contribución importante, marcando la pauta de iniciativas para el desarrollo de proyectos de manejo, conservación y restauración en dichos ambientes.

Uso de la información obtenida

Los enfoques descritos y analizados en el presente trabajo pueden ser utilizados en diferentes campos de conocimiento:

Por un lado, el modelado de la distribución de las diferentes comunidades o asociaciones vegetales con base en atributos fácilmente obtenidos en un sistema de información geográfica, permite desarrollar o actualizar cartografía más robusta. Los resultados del modelo de distribución de la

vegetación pueden ser combinados con clasificaciones de imágenes de percepción remota para mejorar el desempeño de la clasificación en caso de confusión espectral, es decir cuando dos categorías no pueden ser discriminadas con base en su respuesta espectral. El enfoque de modelado y clasificación difusos son particularmente útiles para combinar diferentes criterios, como se mostró en el capítulo V. Dichos modelos podrían ser la base para el desarrollo de sistemas expertos que puedan tomar en cuenta una gran variedad de criterios (respuesta espectral, respuesta temporal-espectral de serie de tiempo, variables ambientales, etc.) para cartografiar o extrapolar información de un muestreo.

Así mismo, un estudio como el que se presentó proporciona información fundamental para sentar las bases del manejo sustentable, ya que el modelado de la distribución de vegetación es un primer paso esencial para representar cartográficamente servicios ambientales, tales como el mantenimiento de la biodiversidad, la producción de biomasa animal y vegetal, la regulación climática, la generación de materias primas para la industria farmacéutica, la belleza escénica de los paisajes, etc. (Daily, 1997; Watson y Zakri, 2003).

Finalmente, el modelado de la distribución de la vegetación puede también utilizarse para desarrollar predicciones ante un escenario de cambio

climático. Por ejemplo, sería posible visualizar los efectos de cambios de temperatura sobre la distribución de las diferentes asociaciones vegetales, modificando las variables de entrada del modelo y, de esta manera, estimar refugios potenciales ante un escenario de cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

Almeida, L.; Cleef, A. M.; Herrera, A. y Velázquez, A. 1994. Phytocoenología. 22(3): 391-436.

Austin, M.P. y Meyers, J.A. 1996. Current approaches to modeling the environmental niche of eucalypts: implication for management of forest biodiversity. *Forest Ecology and Management*. 85: 95-106.

Austin, M.P., Ashton, P.P. y Greig-Smith, P. 1972. The application of quantitative methods to vegetation survey III. A re-examination of rain forest data from Brunei. *Journal of Ecology*, 60: 305-324.

Austin, M.P.; Cunningham, R.B. y Good, R.B. 1983. Altitudinal distribution of several eucalypt species in relation to other environmental factors in southern New South Wales. *Australian Journal of Ecology*. 8:169-180.

Baillie, I.C., Ashton, P.S., Court, M.N., Anderson, J.A.R., Fitzpatrick, E.A. y Tinsley, J. 1987. Site characteristics and the distribution of tree species in Mixed Dipterocarp Forest on tertiary sediments in central Sarawak, Malaysia. *Journal of Tropical Ecology*, 3: 201-220.

Baillie, I.C. 1989. Soil characteristics and classification in relation to the mineral nutrition of tropical wooded ecosystems. In: *Mineral nutrients in*

tropical forest and savanna ecosystems. Ed. Proctor, J. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 15-26.

Bolstad, P. V. y Stowe, T. 1994. An evaluation of DEM accuracy: elevation, slope and aspect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 60(11): 1327-1332.

Bolstad, P. V. y Stowe, T. 1994. An evaluation of DEM accuracy: elevation, slope and aspect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 60: 1327-32.

Burnett MR, August JH, Brown Jr. and Killinberg KT. 1998. *The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity. I. A patch-scale perspective*. *Conservation Biology* 12:363-370.

Couturier, E. 2007, Evaluación de errores de cartas de cobertura vegetal y uso del suelo con enfoque difuso y con la simulación de imágenes de satélite, tesis de doctorado, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, Université Paul Sabatier. Disponible en línea: <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00193828/fr/>

Daily, G.C. Editor. 1997. *Nature's services*. Washington, DC. Island Press.

Del Bon Espirito-Santo, F.; Oliveira-Filho A. T.; Mendonça E. L.; Santos, J.; Leite, M.A. y Granate, J.J. 2002. Variáveis ambientais e a distribuição de espécies arbóreas em um remanescente de floresta estacional semidecídua montana no campus da universidades federal de lavras, MG. *Acta Botânica Brasileira*. 16(3): 331-356.

Duivenvoorden, J.F. y Lips, J.M. 1995. a land-ecological study of soils, vegetation, and plant diversity in Colombian Amazonia. Tropenbos Foundation. Series 12. Netherlands.

Finley, A.O.; Ek, A.R.; Bai, Y. y Bauer, M.E., 2005, K-Nearest Neighbor Estimation of Forest Attributes: Improving Mapping Efficiency, Proceedings of the fifth annual forest inventory and analysis symposium; 2003 November 18-20; New Orleans, LA. Gen. Tech. Rep. WO-69. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture Forest Service. 222p.

Franco-López, H.; A.R. Ek and M.E. Bauer, 2001, Estimation and mapping of forest stand density, volume, and cover type using the k-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environment*, Volume 77, Issue 3, pp. 251-274.

Franklin, J., 1995. Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography*, 19: 474-499.

Gartlan, J.S.; Newberry, D.M.; Thomas, D.W. y Waterman, P.G. 1986. The influence of topography and soils phosphorus on the vegetation of Korup Forest Reserve, Cameroun. *Vegetatio*. 65:131-148.

Geig-Smith, P. 1971. Application of numerical methods to tropical forests. In: *Statistical Ecology*. Volume 3. Populations, ecosystems and system Analysis. Eds. Patil, G.P; Pielou, E.C. y Waters, E. E. Pennsylvania State University Press.

Gentry, A.H. 1988. Changes in plant community diversity and floristic composition on environment and geographical gradients. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 75: 1-34.

Gentry, A.H. 1995. Diversity and floristic composition of neotropical dry forest. Editores: Bullock, S. H.; Mooney, H.A. y Medina, E. *Seasonally dry tropical forest*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Giménez, J., Ramirez, I. y Pinto, M. 2003. Las comunidades vegetales de la Sierra de Angangueo (Estados de Michoacán y México, México): clasificación, composición y distribución. *Lazaroa* 24:87-111.

González, F. 2003. Las comunidades vegetales de México. Propuesta para la unificación de la clasificación y nomenclatura de la vegetación de México. INE- SEMARNAT. México. 77pp.

Guerrard, R.A., Church, R.L., Stoms, D.M. y Davis, F.W. 1997. Selecting conservation reserves using species covering models: Adapting the ARC/INFO GIS. *Transactions in GIS* 2: 45-60.

Guisan, A. y Zimmerman, N. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecology Modelling*. 135(2): 147-186.

Hall, J.B. y Swaine, M.D. 1976. Classification and ecology of closed-canopy forest in Ghana. *Journal of Ecology*, 64:913-951.

Hoersch, B., Braun G. y Schmidt, U., 2002. Relation between landform and vegetation in alpine regions of Wallis, Switzerland. A multiscale remote sensing and GIS approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26:113-139.

Islebe G., Almeida-Leñero, L. y Cleef A. 2003. Fitosociología y fitodiversidad de la Laguna Quila, Parque Nacional Lagunas de Zempoala, México. *Acta Botánica Mexicana*, 65:61-82.

Islebe, G.A. y Velázquez, A., 1994. Affinity among mountain ranges in Megamexico: A phytogeographical scenario. *Vegetatio*. 115:1-9.

Lassueur, T.; Joost, S. y Randin, C.F. 2006. Very high resolution digital elevation models : Do they improve models of plant species distribution?. *Ecological Modelling*, 198: 139-153.

Lawson, G.W.; Armstrong-Mensah, K.O. y Hall, J.B. 1970. A catena in tropical moist semi-deciduous forest near Kade, Ghana. *Journal of Ecology*. 58:371-398.

Lott, E. 1993. annotated checklist of the vascular flora of the Chamela Bay region, Jalisco, Mexico. *Occasional Papers of the California Academy of Science*. 148:1-60.

Miranda, F. y Hernández-Xolocotzi, E. 1963. Los tipos de Vegetación de México y su Clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 23. C.P. SARH. México.

Newbery, D. y Proctor, J. 1984. Ecological studies in four contrasting lowland rain forests in Gunung Mulu National Park, Sarawak. IV associations between tree distribution and soil factors. *Journal of Ecology*. 72:475-493.

Nichols WF, Killinbeck KT and August PV. 1998. The influence of geomorphology heterogeneity on biodiversity. A landscape perspective. *Conservation Biology* 2:371-379.

Oliveira-Filho, A.T.; Vilela, E. A.; Carvalho, D.A. y Gavilanes, M.L. 1994. Effects of soils and topography on the distribution of tree species in a tropical riverine forest in south-eastern Brazil. *Journal of Tropical Ecology*. 10:483-508.

Pedrotti, F. 2004. *Cartografía Geobotánica*. Pitagora Editrice. SELCA. Bologna. 236.

Peinado, M., Alcaraz, F., Delgadillo, J. y Aguado, I. 1994. *Anales Jardín Botánico Madrid*. 51(2): 255-277.

Pennington, T.D. y Sarukhán, J. 1968. *Manual para la identificación de campo de los principales árboles tropicales de México*. INIF. ONU. México.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

Pyke, C.; Condit, R.; Aguilar, S. y Suzanne, L. 2001. *Journal of Vegetation Science*. 12: 553-566.

Raupach M.R. y Finnigan J.J., 1997. The influence of topography on meteorological variables and surface-atmosphere interactions, *Journal of Hydrology*, 190:182-213.

Richards, P.W. 1952. *The tropical rain forest*. University Press, Cambridge.

Robichaux, R.H. y Yetman, D.A. (Editores). 2000. *The tropical Deciduous forest Alamos. Biodiversity of a Threatened Ecosystem in Mexico*. The University of Arizona Press, Tucson.

Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Ed. Limusa. México.

Sherve, F. 1942^a. The desert vegetation of North America. *Bot. Rev.* 8: 195-246.

Sherve, F. 1951. *Vegetation of the Sonoran desert*. Carn. Inst. Wash. Publ. 591: 1-192.

Stocks, A. y Heywood, I. 1994. *Terrain modelling for mountains. Mountains Environments and Geographic Information Systems*. Taylor & Francis Ltd.

Trejo, I. Y Dirzo, R. 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation*. 94:133-142.

Trejo, I., 1998. *Distribución y diversidad de selvas bajas de México: relaciones con el clima y el suelo*. Ph.D. Tesis, Facultad de Ciencias, UNAM. México, D. F.

Van NielKimberly P., Laffan Shawn W. y LeesBrian G. 2004. *Journal of Vegetation Science*. Vol. 15, 6: 747-756.

Velázquez, A. 1994. Multivariate analysis of the vegetation of the volcanes Tláloc and Pelado, Mexico. *Journal of Vegetation Science* 5: 263-270.

Velázquez, A., J. Giménez de Azcárate, M. Escamilla, G. Bocco y E. van der Maarel. 2001. Vegetation dynamics on Paricutin, a recent Mexican volcano. *Acta Phytogeographica Suecica*. 85: 71-78.

Velázquez, A.; Mas, J.F.; Díaz-Gallegos, J.; Mayorga, R.; Alcántara, C.; Castro, R.; Fernández, T.; Bocco, G.; Ezcurra, E. y Palacio, J. L. 2003. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica INE-SEMARNAP*. México. 62:21-37.

Villers-Ruiz, L.; Trejo_vazquez, I. Y López-Blanco, J. 2003. Dry vegetation in relation to the physical environment in the Baja California Peninsula, Mexico. *Journal of vegetation Science*. 14: 517-524.

Watson, R.T. y Zakri, H.A. Editores. 2003. *Ecosystems and human well-being*. Millennium Ecosystem Assessment. Washington, D.C. Island Press.

Webster, T. L., Murphy, B. y Gosse, J. Mapping subtle structures with light detection and ranging (LIDAR): flow units and phreatomagmatic rootless cones in the North Mountain Basalt, Nova Scotia. *Canadian Journal of Earth Science*. 43(2): 157–176

Wechsler, S. y Kroll C.N. 2006. Quantifying DEM Uncertainty and its effects on topographic. *Parameters, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 72, No. 9: 1081-1090pp.

Wheatley J.M., J.P. Wilson, R.L Redmont, Z. Ma y J. DiBenedetto, 2000. Automated Land Cover Mapping Using Landsat Thematic Mapper Images and Topographic Attributes, in *Terrain Analysis, Principles and Applications*, editado por J.P. Wilson y J.C. Gallant, John Wiley & Sons, Inc, 479 p.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

Wijngaarden van W., 1985. Elephants, trees, Grass and Grazers. Relationships between climate, soils, vegetation and large herbivores in a semi-arid savanna ecosystem (Tsavo, Kenya). International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). Publication Number 4.

Wilson, J.P. y Gallant J.C. 2000. Digital Terrain Análisis. En: Terrain Analysis. Principles and applications. Editores: Wilson, J.P. y Gallant J.C. John Wiley & Sons, INC. Canberra, Australia.

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

Tabla 1 – Lista de especies mayores de 3 m de altura encontradas en los 37 relevés con su rango de cobertura y algunas características ambientales

RELEVÉ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
Altitud	580	710	690	390	350	285	288	340	368	358	325	338	335	358	630	710	419	445	435	955	945	930	400	505	468	360	400	410	395	780	790	750	480	495	505	380	380	
Exposición	0	2	0	2	2	0	2	2	0	0	0	0	0	2	0	0	2	2	1	2	2	2	0	2	2	0	0	2	2	2	0	0	0	0	2	0	0	2
Curvatura en planta	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2	3	1	1	1	1	2	1	1	3	1	3	1	2	1	1	1	
Pendiente en grados	30	30	35	17	22	18	23	32	28	22	20	22	28	32	32	32	18	25	18	44	31	30	24	31	36	18	26	24	26	34	26	40	23	28	22	20	18	
Profundidad del suelo en cms.	4	2	7	4	10	3	22	32	28	22	20	22	28	5	52	8	18	15	19	51	68	70	58	40	30	60	49	58	41	52	40	0	16	15	47	30	25	
% de arena	90	90	80	20	10	20	80	80	80	30	30	30	30	50	20	20	65	80	30	80	90	90	30	30	20	30	80	30	80	60	60	60	80	80	80	60	60	
Cobertura arbórea (%)	90	70	62	60	48	95	95	45	95	90	45	75	95	50	50	10	50	60	20	35	40	70	55	50	40	50	60	50	50	70	70	90	40	70	75	50	80	
Altura máxima de árboles (m)	15	11	12	5	6	6	10	7	8	7	6	7	10	5	12	12	15	15	12	20	12	14	12	16	14	11	14	13	11	20	20	20	15	16	15	16	8	
NOMBRE CIENTIFICO																																						
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.																							1						1					1	2	1		
<i>Acacia houghii</i> (britton & Rose)					1	2	1	4																														
<i>Amphipterygium adstringens</i> (Schltd.) Standl.			1									1													1	4	4											4
<i>Apoplanesia paniculata</i> C. Presl				2			1	1		1	2		1	1						1	1																	
<i>Astronium graveolens</i> Jacq.																																					1	
<i>Bauhinia divaricata</i> L.											1		1	3		4															1	1						
<i>Bauhinia unguolata</i> L.												1	1																									
<i>Bursera coyucensis</i> Bullock				2	2		1	2												1		1			1													
<i>Bursera exelsa</i> (Kunth.)									1																													
<i>Bursera grandifolia</i> Engl.				2							1			2																	1							
<i>Bursera heteresthes</i> Bullock																				4		1			2			1	4			1	4	4	2			
<i>Bursera instabilis</i> McVaugh&Rzed.		2										1																										
<i>Bursera simaruba</i> (L.)																				3	2								1								1	1
<i>Caesalpinia cacalaco</i> Humb. & Bonpl.														1																								
<i>Caesalpinia coriaria</i> (Jacq.) Willd.													1	1																								
<i>Caesalpinia eriostachys</i> Benth.					2	3	1		1		4	1	3																									
<i>Caesalpinia hintonii</i> Sandwith																																						
<i>Caesalpinia platyloba</i> S. Watson				1	1	2		1	2		1																			1								
<i>Caesalpinia velutina</i> (Britton & Rose) Standl.						2																														1		1
<i>Ceiba aesculifolia</i> (Kunth.) Britten & Baker f.	1				1										3					1					1							4	2				1	
<i>Chiococca alba</i> (L.) Hitchc.																																					1	
<i>Coccoloba barbadensis</i> Jacq.												1										3																1
<i>Coccoloba venosa</i> L.												2										3		2														
<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Wild.) Spreng	2	1	3								1		1				1	2	1			1	1	1						3	1	1	4			2		
<i>Conzattia multiflora</i> (B.L. Rob.) Standl.					1																															1	1	1
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken											1			1												1												
<i>Cordia curassavica</i> (Jacq.) Roem. & Schult.											1																											
<i>Cordia dodecandra</i> A. DC.				2		1	1	1	1	1				1																								
<i>Cordia elaeagnoides</i> A. DC.			3	1	3	2	2	1	3	2	3			2		2			4	1						1	1	4	4	4	2		1	2	3	2		2
<i>Cordia sonora</i> Rose																						1																
<i>Coursetia mollis</i> B. L. Rob. & Greenm.													1											1													2	1
<i>Croton draco</i> Schltdl										1																												
<i>Croton flavescens</i> Greenm.				1			2	2	1		1			1															1									
<i>Cupania dentata</i> Moc. & Sessé ex DC.									1																													

ANEXOS

Anexo 2. Listado florístico de la microcuenca de San José de Chila (Salazar, 2008).

Clase Pteridophyta

Nombre científico	Familia	Nombre común	Forma de vida
Adiantum capillus-Veneris L.	Adiantaceae	Cilantrillo	Herbácea
Adiantum sp.	Adiantaceae	Cilantrillo	Herbácea

Clase Coniferophyta

Nombre científico	Familia	Nombre común	Forma de vida
Pinus Sp.	Pinaceae	Pino Somonque	Árbol

Clase Mangnoliopsida

Nombre científico	Familia	Nombre común	Forma de vida
Averia longipes Standl.	Acanthaceae	??	Herbácea
Carlowrightia costaricana Leonard	Acanthaceae	Chiste	Herbácea
Elytraria imbricata (Valh) Pers.	Acanthaceae	Hierba buenilla	Herbácea
Elytraria mexicana Fryxell & Koch.	Acanthaceae	Hierba buenilla	Herbácea
Henrya insularis Nees.	Acanthaceae		Herbácea
Justicia bartletti Standl.	Acanthaceae		Herbácea
Justicia candicans(Ness) L.D Benson	Acanthaceae	Tronadora	Arbusto

Justicia spicigera Schldl.	Acanthaceae	Vara blanca	Arbusto
Ruellia inundata Kunth.	Acanthaceae		Herbácea
Ruellia lanatoglandulosa (Nees) Lindau	Acanthaceae	Riendilla	Herbácea
Ruellia sp.	Acanthaceae		Herbácea

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

Tetramerium nervosum Ness.	Acanthaceae		Herbácea
Amaranthus spinosus L.	Amaranthaceae	Quelite	Herbácea
Iresine calea Standl.	Amaranthaceae	Hierba del arlomo	Herbácea
Iresine interrupta Benth.	Amaranthaceae	Hierba del arlomo	Herbácea
Iresene rhizomatosa Standl.	Amaranthaceae	Hierba del arlomo	Herbácea
Astronium graveolens Jacq.	Anacardiaceae	Culebro	Árbol
Comocladia engleriana Loes.	Anacardiaceae	Palo bravo	Árbol
Cyrtocarpa procera Kunth.	Anacardiaceae	Chicumpe	Árbol
Pseudosmodingium perniciosum (Kunth) Engl	Anacardiaceae	Hincha huevo	Árbol
Spondias purpurea L.	Anacardiaceae	Ciruelo Amarillo	Árbol
Anona sp.	Annonaceae		Árbol
Anona cherimola	Annonacea	Chirimolla	Árbol
Plumeria rubra L.	Apocynaceae	Cacalosúchil	Árbol
Rauwolfia tetraphylla L.	Apocynaceae	Lechoso	Arbusto
Stemmadenia donnell-smithii (Rose) Woodson	Apocynaceae	Huevo de toro	Árbol
Stemmadenia tomentosa Var. Palmeri (Rose & Standl) Woodson	Apocynaceae		Árbol
Stemmadenia sp	Apocynaceae		Árbol
Tabernaemontana amygdalifolia Jacq.	Apocinaceae	Temasate	Árbol
Tabernaemontana arborea Rose	Apocynaceae		Árbol
Thevetia ovata (Cav.) A. DC.	Apocynaceae	Ayoyote	Árbol
Thevetia peruviana (Pers.) K. Schum.	Apocynaceae		Árbol
Thevetia pinifolia (Standl & Steyerl) J. K. Williams	Apocynaceae		Árbol

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

Aristolochia foetida Kunth.	Aristolochiaceae	Tigrillo	Bejuco
Aristolochia spp	Aristolochiaceae		Bejuco
Asclepias Curassavica L.	Asclepiadaceae	Trompetilla	Herbácea
Cryptostegia grandiflora (Roxb.) R. BR.	Asclepiadaceae	Campanilla	Bejuco
Cynanchum sp.	Asclepiadaceae		Bejuco
Cynanchum foetida (Cav.) HBK.	Asclepiadaceae	Guacuco	Bejuco
Marsdenia astephanoides (A. Gray) Woods	Asclepiadaceae	Chichi burra	Liana
Marsdenia lanata Decne	Asclepiadaceae	Ojo de venado	Bejuco
Mateleia quirosii (Standl.) Woods	Asclepiadaceae		Bejuco
Baccharis salicifolia. Ruiz & Pav.	Asteraceae		Herbácea
Bidens odorata Cav.	Asteraceae		Herbácea
Bidens pilosa L.	Asteraceae		Herbácea
Brickellia sp	Asteraceae		Herbácea
Cirsium amartiolepis Petrak.	Asteraceae		Arbusto
Cirsium subcoriaceus(Less.) Sch. Bip	Asteraceae		Arbusto
Cosmos bipinnatus Cav.	Asteraceae	Amapola	Herbácea
Eupatorium odoratum L.	Asteraceae		Herbácea
Jaliscoa pringlei S. Watson	Asteraceae		Arbusto
Jessea megaphylla (Greenm.) H. Rob. & Catrec	Asteraceae	Tacote blanco	Arbusto
Montanoa bipinnatifida (Kunth) K. Koch	Asteraceae	Tacote	Arbusto
Porophyllum nutans DC.	Asteraceae	Hierba del venado	Herbácea

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

Senecio sp	Asteraceae		Herbácea
Tagetes lucida Cav.	Asteraceae	Cempasúchil	Herbácea
Tithonia rotundifolia (Mill.) S. F. Blake	Asteraceae	Andan	Arbusto
Verbesina fastigiata B.L. Rob. & Greenm	Asteraceae	Capitaneja	Arbusto
Verbesina lottiana Turner & Olsen	Asteraceae		Arbusto
Vernonia salicifolia (DC.) Sch. Bip.	Asteraceae		Arbusto
Arrabidaea viscida (Donn. Sm.) A. Gentry	Bignoniaceae	Cuerno de venado	Bejuco
Astinthus viminalis(Kunth) Bail	Bignoniaceae	Ahuejote	Árbol
Crescentia alata Kunth.	Bignoniaceae.	Ciriam	Árbol
Melloa quadrivalvis (Jacq.) A. Gentry	Bignoniaceae		Liana
Pithecoctenium crucigerum (L.) A. Gentry	Bignoniaceae		Liana
Tabebuia chrysantha (Jacq.) Nicholson	Bignoniaceae	Primavera	Árbol
Tabebuia donnell-smithii Rose	Bignoniaceae	Cuerno de borrego	Árbol
Tabebuia impetiginosa (Mart.) Standl.	Bignoniaceae	Cañofistula	Árbol
Tabebuia palmeri Rose	Bignoniaceae		Árbol
Tabebuia rosea (Bertol.) DC.	Bignoniaceae	Rosa morada	Árbol
Tecoma stans (L.) Jussex. ex Kunth	Bignoniaceae	Lluvia de oro	Árbol
Ceiba aesculifolia (Kunth.) Britt. & Rose	Bombacaceae	Pochote	Árbol
Ceiba pentandra (L.) Gaertn.	Bombacaceae	Ceiba	Árbol
Pseudobombax ellipticum (Kunth) Dugand	Bombacaceae	Clavellina	Árbol
Bourreria purpusii Brandegee	Boraginaceae		Arbusto
Cordia alliodora (Ruiz & Pav.) Oken	Boraginaceae	Palo Maria	Árbol
Cordia curassavica	Boraginaceae	Frutilla	Arbusto

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

(Jacq.) Roem. & Schult.			
Cordia dentata Poir.	Boraginaceae	Tapa camino	Árbol
Cordia dodecandra A.DC.	Boraginaceae		Árbol
Cordia elaeagnoides A.DC.	Boraginaceae	Cueramo	Árbol
Cordia seleriana Fern.	Boraginaceae		Árbol
Cordia sonora Rose	Boraginaceae	Encina	Árbol
Cordia sp	Boraginaceae		Árbol
Heliotropium sp	Boraginaceae		Arbusto
Bursera aleoxylon (Schiede ex Schltl) Engl.	Burseraceae.	Linaloé	Árbol
Bursera copallifera (Sessé et Moc.) Bullock.	Burseraceae	Copal cimarron	Árbol
Bursera coyusensis(Bullok)	Burseraceae	Tecomaca	Árbol
Bursera excelsa (Kunth.) Engl.	Burseraceae	Copal	Árbol
Bursera fagaroides (Kunth.) Engl.	Burseraceae	Papelillo	Árbol
Bursera fagaroides var elongata McVaugh & Rzed	Burseraceae	Chirakoque	Árbol
Bursera grandifolia. Var macrophylla	Burseraceae		Árbol
Bursera grandifolia (Schltl.) Engl.	Burseraceae		Árbol
Bursera heteresthes Bullock	Burseraceae	Palo jote	Árbol
Bursera instabilis MacVaug & Rzed.	Burseraceae		Árbol
Bursera simaruba (L.)	Burseraseae	Palo jote	Árbol
Bursera trifoliata	Burseraceae		Árbol
Bursera velutina Bullock	Burseraceae		Árbol
Lobelia laxiflora Kunth	Campanulaceae	Gallito	Herbácea
Jacaratia mexicana A.DC.	Caricaceae	Bonete	Árbol
Neobuxbamia sp.	Cactaceae		Árbol
Opuntia atropes Rose	Cactaceae	Nopal	Árbol
Opuntia exelsa Sanchez-Mejorada	Cactaceae	Nopal	Árbol
Opuntia depressa Rose	Cactaceae	Nopal	Árbol
Pachycereus pecten-aboriginum (Engelm.) Britton & Rose	Cactaceae	Órgano	Cacto columnar
Selenicereus vagans (K. Brand) B. & R.	Cactaceae		Rastrera
Stenocereus thurberi	Cactaceae	Pitaya	Cacto

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

(Engelm.) Buxbaum			columnar
Stenocereus fricci Sanchez-Mejorada	Cactaceae		Cacto columnar
Capparis angustifolia Kunth	Capparidaceae	Alma negra	Arbusto
Capparis incana Kunth	Capparidaceae	Palo cenizo	Arbusto
Capparis sp.	Capparidaceae		Arbusto
Cleome viscosa L.	Capparidaceae	Barbas	Bejuco
Crataeva tapia L.	Capparidaceae	Papallilla	Árbol
Forchhammeria pallida L.	Capparidaceae	Alma	Árbol
Morisonia Americana Liebm.	Capparidaceae	Rudilla	Árbol
Licania arborea Seem	Chrysobalanaceae	Cuirindal	Árbol

Clusia salvanii Donn. Sm.	Clusiaceae	Encina blanca	Árbol
Cochlospermum vitifolium (Willd.) Spreng	Cochlospermaceae	Panicua	Árbol
Combretum farinosum Kunth	Combretaceae	Cepillo	Bejuco
Ipomoea bracteata Cav.	Convolvulaceae	Camelina	Bejuco
Ipomoea hederifolia	Convolvulaceae	Rosa morada	Bejuco
Ipomoea nil (L.) Roth.	Convolvulaceae		Bejuco
Ipomoea purpurea (L.) Roth	Convolvulaceae		Bejuco
Ipomoea wolcottiana Rose.	Convolvulaceae	Palo bobo	Árbol
Ipomoea wrightii A. Gray	Convolvulaceae		Bejuco
Cucumis dipsaceus Spach.	Cucurbitaceae	Pepinillo	Rastrera
Cucurbita angyrosperma (L.H. Bailey.) Merrick & Bates	Cucurbitaceae	Calabacita	Rastrera
Doyorea emetocathartica Gross	Cucurbitaceae	Tripa de buey	Rastrera
Erythroxyton mexicanum HBK.	Erythroxylacaceae		Árbol
Erythroxyton pringlei	Erythroxylacaceae	Dormilona	Árbol
Erythroxyton rotundifolium Lunan sens. lat.	Erythroxylacaceae	Dormilona	Árbol
Cnidocolus angustidens Torr.	Euphorbiaceae	Mala mujer	Arbusto

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

Cnidoscopus spinosus Lundell	Euphorbiaceae	Mala mujer	Arbusto
Croton alamosanus Rose	Euphorbiaceae		Arbusto
Croton draco Schltld	Euphorbiaceae	Llora sangre	Árbol
Croton flavescens Greenm	Euphorbiaceae	Canelillo	Árbol
Croton suberosus HBK.	Euphorbiaceae	Dominguilla	Árbol
Jatropha galvanii J. Jiménez Ram. & L.M. Contr. Jim.	Euphorbiaceae	Girakoke	Árbol
Hura polyandra Bail	Euphorbiaceae	Habillo	Árbol
Manihot aesculifolia (Kunth.) Pohl	Euphorbiaceae		Árbol
Manihot tomatophylla Standl.	Euphorbiaceae	Papayo	Árbol
Ricinus communis L.	Euphorbiaceae	Higuerilla	Arbusto
Sebastiana sp.	Euphorbiaceae	Quemadora	Arbusto
Quercus conspersa Benth.	Fagaceae	Tepescohuite	Árbol
Quercus dysophylla Benth.	Fagaceae		Árbol
Quercus glaucoides Martens et Galeotti	Fagaceae	Encino ticus	Árbol
Quercus magnolifolia Née	Fagaceae.	Encina negra	Árbol
Quercus obtusa Willd.	Fagaceae		Árbol
Quercus resinosa Liebm.	Fagaceae		Árbol
Quercus sororia Liebm.	Fagaceae	Jaboncillo	Árbol
Samyda mexicana Rose	Flacourtiaceae	Trementinillo	Arbusto
Hippocratea acapulcensis HDK.	Hippocrataceae		Liana
Hippocratea celastroides Kunth	Hippocrataceae	Tripa de buey	Liana
Hippocratea volubilis L.	Hippocrataceae		Liana
Pristimeria celastroides (HBK.) A. C. Sm.	Hippocrataceae		Liana
Wigandia urens Var. Coracasana (Ruiz & Pav.) HBK.	Hydrophyllaceae	Ortiga real	Arbusto
Amphipterygium adstringens Schiede. Schltd.	Julianaceae	Cuachalalate	Árbol

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

Amphipterygium glaucum Hemsl. & Rose	Julianaceae	Cuachalalate	Árbol
Persea Americana (Mill.)	Lauraceae	Aguacate	Árbol
Hyptis stellulata Benth.	Labiatae		Herbácea
Lepechinia caulescens (Ortega) Epling.	Labiatae		Herbácea
Salvia thyrsoiflora Benth.	Labiatae		Arbusto
Calophyllum brasiliense Cambess.	Guttiferae	Leche maría	Árbol
Andira inermis (W. Wright) HBK. DC.	Leguminosae, Papilionoideae	Cuero de vaca	Árbol
Apoplanesia paniculata C. Presl.	Leguminosae, Papilionoideae	Rudilla	Árbol
Brongniartia sp.	Leguminosae, Papilionoideae	Palo cenizo	Arbusto
Coursetia glandulosa A. Gray.	Leguminosae, Papilionoideae	Paracata	Árbol
Coursetia mollis Robinson & Greenman	Leguminosae, Papilionoideae	Zopilotillo	Árbol
Dalbergia congestiflora Pittier	Leguminosae, Papilionoideae	Campinceran	Árbol
Dalbergia granadillo Pittier	Leguminosae, Papilionoideae	Zangaluica	Árbol
Desmodium sp.	Leguminosae, Papilionoideae		Arbusto
Diphysa occidentalis Rose	Leguminosae, Papilionoideae	Esponjocillo	Árbol
Erythrina brevifolia DC.	Leguminosae, Papilionoideae	Colorín	Árbol
Erythrina Herbácea L.	Leguminosae, Papilionoideae	Colorín	Árbol
Eysenhardtia polystachya (Ortega.) Sarg.	Leguminosae, Papilionoideae	Palo dulce	Árbol
Gliricidia sepium (Jacq.) Steud	Leguminosae, Papilionoideae	Frijolillo	Árbol
Lonchocarpus caudatus Pitt.	Leguminosae, Papilionoideae	Palo fierro	Árbol
Lonchocarpus constrictus Pitt.	Leguminosae, Papilionoideae		Árbol
Lonchocarpus eriocarinalis Micheli.	Leguminosae, Papilionoideae	Vara blanca	Árbol
Lonchocarpus hintonii Sandwith.	Leguminosae, Papilionoideae	Balsamillo	Árbol

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

Lonchocarpus sp.	Leguminosae, papilonoideae		Árbol
Poeppigia procera C. Presl.	Leguminosae, Papilonoideae.		Árbol
Pterocarpus orbiculatus DC.	Leguminosae, Papilionioideae	Balsamo	Árbol
Pterocarpus sp.	Leguminosae, Papilonoideae		Árbol
Caesalpinia alata Benth.	Leguminosae, Caesalpinoideae		Arbusto
Caesalpinia cacalaco Kunth.	Leguminosae, Caesalpinoideae		Árbol
Caesalpinia caladenia Standl.	Leguminosae, Caesalpinoideae		Arbusto
Caesalpinia coriaria (Jacq.) Willd.	Leguminosae, Caesalpinoideae	Cascalote	Árbol
Caesalpinia eriostachys Benth.	Leguminosae, Caesalpinoideae	Iguanero	Árbol
Caesalpinia hintonii Sandwith	Leguminosae, Caesalpinoideae	Chinito	Árbol
Caesalpinia platyloba (Micheli) J. F. Macbr.	Leguminosae, Caesalpinoideae	Guacamayo	Árbol
Caesalpinia pulcherrima (L.) Swartz	Leguminosae, Caesalpinoideae	Flor de paraiso	Árbol
Caesalpinia velutina (Britton & Rose.) Standl.	Leguminosae, Caesalpinoideae	Cola de choncho	Árbol
Cercidium microphyllum (Torr.) Rose & IM Johnston	Leguminosae, Caesalpinoideae	Palo verde	Árbol
Cercidium praecox (R. & P.) Harms.	Leguminosae, Caesalpinoideae	Palo verde	Árbol
Conzattia multiflora (B.L. Rob.) Standl.	Leguminosae, Caesalpinoideae	Palo blanco	Árbol
Bahuinia divaricata	Leguminosae, Caesalpinoideae	Pata de cabra	Árbol
Bahuinia pauletia (standl)	Leguminosae, Caesalpinoideae	Pata de cabra	Árbol
Bahuinia ungulata L.	Leguminosae, Caesalpinoideae	Pata de cabra	Árbol
Haematoxylon brasiletto H.Karst.	Leguminosae, caesalpinoideae	Palo brasil	Árbol
Poeppigia procera (Vahl) HS Irwin & Barneby	Leguminosae, Caesalpinoideae		Árbol
Senna alata (L.) Roxb.	Leguminosae, Caesalpinoideae	Huichillo	Arbusto
Senna atomaria L. Irwin &	Leguminosae,	Vainillo	Árbol

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

Barneby	Caesalpinoideae		
Senna fruticosa(Benth.) H.S. Irwin & Barneby	Leguminosae, Caesalpinoideae	Huichillo	Arbusto
Senna holwayana (Rose) Irwin & Barneby	Leguminosae, Caesalpinoideae		Arbusto
Senna mollissima var glabrata (Benth.) H.S. Irwin & Barneby	Leguminosae, caesalpinoideae		Arbusto

Senna occidentalis (L.) Link.	Leguminosae, Caesalpinoideae		Arbusto
Senna pallida (Mill.) L & B.	Leguminosae, Caesalpinoideae	Huicho	Arbusto
Senna skinneri (Benth.) H.S. Irwin & Barneby	Leguminosae, Caesalpinoideae		Arbusto
Senna uniflora (Mill.) H. S Irwin & Barneby	Leguminosae, Caesalpinoideae	Frijolillo	Arbusto
Acacia angustissima (Mill.) Kuntze	Leguminosae, Mimosoideae		Árbol
Acacia cochliacantha Humb. & Bonpl.Ex Willd	Leguminosae, Mimosoideae	Huisache concho	Árbol
Acacia farnesiana (L.) Willd.	Leguminosae, Mimosoideae	Huisache	Árbol
Acacia houghii (britton & Rose)	Mimosoideae		Árbol
Acacia macrantha Humb. & Bonpl.	Leguminosae, Mimosoideae	Huisache	Arbusto
Acacia pennatula Schldl. & Cham.) Benth.	Leguminosae, Mimosoideae	Tarepe	Árbol
Acacia picachensis Brandege	Leguminosae, Mimosoideae		Árbol
Albizia tomentosa Micheli. (Standl.)	Leguminosae, Mimosoideae	Parotilla blanca	Árbol
Calliandra sp.	Leguminosae Mimosoideae	Cabello de angel blanco	Árbol
Calliandra houstoniana (Mill.) Standl.	Leguminosae, Mimosoideae	Cabello de angel rojo	Árbol

Entada polystachya (L.) DC.	Leguminosae, Mimosoideae	Palo dulce	Árbol
Enterolobium ciclocarpum (Jacq.) Griseb	Leguminosae, Mimosoideae	Parota	Árbol
Leucaena esculenta (Moc & Sessé. ex DC.) Benth.	Leguminosae, Mimosoideae	Guaje	Bejuco, Leñoso
Leucaena leucocephala	Leguminosae,	Guajillo	Árbol

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

(Lam.) de Wit	Mimosoideae		
Leucaena macrophylla Benth.	Leguminosae, Mimosoideae	Guaje colorado	Árbol
Lysiloma acapulcense (kunth) Benth.	Leguminosae, Mimosoideae	Tepehuaje	Árbol
Lysiloma divaricatum (Jacq.) J.F. Macbr	Leguminosae, Mimosoideae	Tepemesquite	Árbol
Lysiloma microphyllum C.Presl	Leguminosae, Mimosoideae	Minazco	Árbol
Lysiloma tergeminum Benth.	Leguminosae, Mimosoideae	Guacamayo	Árbol
Lysilomoma sp	Leguminosae, Mimosoideae		Árbol
Mimosa sp	Leguminosae Mimosoideae	Flor de castilla	Bejuco
Mimosa pigra L.	Leguminosae, Mimosoideae	Sierrilla	Bejuco
Mimosa polyantha Benth.	Leguminosae, Mimosoideae	Sierrilla	Bejuco
Mimosa polyanthoides Robinson	Leguminosae, Mimosaseae	Sierrilla de guía	Liana

Mimosa quadrivalvis (Var. Difusa) (Rose) Beard.	Leguminosae, Mimosoideae	Sierilla	Rastrera
Piptadenia constricta (Micheli) J. F. Macbr	Leguminosae, Mimosoideae	Flor de castilla	Arbusto
Piptadenia oblicua (Pers.) Mac Bride	Leguminosae, Mimosoideae		Árbol
Pithecellobium dulce (Roxb.) Benth.	Leguminosae, Mimosoideae	Pinzan	Árbol
Prosopis juliflora (SW.) DC.	Leguminosae, Mimosoideae	Mezquite	Árbol
Prosopis laevigata(H & B. ex willd) M.C. Johnst	Leguminosae, Mimosoideae		Arbusto
Buddleja sessiflora HBK.	Logoniaceae	Cenicilla	Arbusto
Phoradendron sp	Loranthaceae	Injerto	Hepifita
Byrsonima crassifolia L. Rich.	Malphigeaceae	Nanche	Árbol

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

Heteropterys palmeri Rose	Malphigieaceae		Bejuco
Malphigia mexicana L.	Malphigieaceae		Arbusto
Abutilon trisulcatum (Jacq.) Urban	Malvaceae	Guinarcillo	Arbusto
Gossypium aridum (Rose & Standl) Skovst.	Malvaceae	Algodoncillo blanco	Árbol
Gossypium hirsutum L.	Malvaceae	Pata de oso	Arbusto/Ár bol
Kosteletzkya depressa (L.) O.J. Blanch., Fryxell & D.M. Bates	Malvaceae		Herbácea

Malchra alceifolia Jacq.	Malvaceae		Herbácea
Sida rhombifolia L.	Malvaceae	Huinar	Herbácea
Martynia annua L.	Martynaceae	Uña de gato	Arbusto
Trichilia Americana (Sessé & Moc.) T.D. Penn.	Meliaceae	Huevo de tlacuache	Arbusto/Ár bol
Trichilia havanensis Jacq.	Meliaceae		Arbusto
Trichilia hirta L.	Meliaceae.	Huevo de gato	Árbol
Trichilia trifoliata L.	Meliaceae		Árbol
Cissampelos Pereira (B. L. Rob.)	Menispermaceae		Bejuco
Cissampelos tropaeolifolia D.C.	Menispermaceae		Bejuco
Brosinum alicastrum (SW.)	Moraceae	Huje	Árbol
Ficus cotinifolia (HBK)	Moraceae	Higuerilla	Árbol
Ficus insipida Willd.	Moraceae	Higuera Blanca	Árbol
Ficus petiolaris Kunth.	Moraceae	Higuera	Árbol
Ficus tecolutensis (Liebm.) Miq.	Moraceae	Mata palo	Árbol
Trophis racemosa (L.) Urb.	Moraceae		Árbol
Eugenia capuli (Cham. & Schltdl.) Berg.	Myrtaceae		Árbol
Psidium guajava L.	Myrtaceae	Guayaba	Árbol

Psidium sartorium (O. Berg)	Myrtaceae	Guayabilla	Árbol
Neea fagifolia Cav.	Nyctaginaceae		Árbol
	Niyctaginaceae		

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

Guapira macrocarpa Heimerl.		Platanillo	Árbol
Guapira sp	Nyctaginaceae		Arbusto
Salpianthus arenarius Humb. & Bonpl.	Nyctaginaceae	Catarina	Arbusto
Salpianthus purpurascens (Cav.) Hook. & Arn.	Nyctaginaceae	Bugambilia	Arbusto
Lopezia racemosa (Cav.) Hook. & Arn.	Onagraceae		Herbácea
Argemone mexicana Var Roleuca L.	Papaveraceae	Manca coyote	Herbácea
Piper Sp.	Piperaceae	Achoque	Arbusto
Plumbago scandens L.	Plumbaginaceae		Herbácea
Coccoloba barbadensis Jacq.	Polygonaceae	Jovero	Árbol
Coccoloba liebmannii Lindau	Polygonaceae	Jovero	Árbol
Coccoloba venosa L.	Polygonaceae	Joverito	Árbol
Podopterus cordifolius Rose & Standl.	Polygonaceae		Arbusto/Árbol
Podopterus mexicanus Humb. & Bonpl.	Polygonaceae		Arbusto/Árbol
Ruprechtia fusca Fernald	Polygonaceae	Pata de gallina	Árbol
Ruprechtia pallida Standl.	Polygonaceae		Árbol
Securidaca diversifolia (L.) Blake	Polygalaceae	Rosa morada	Bejuco
Clematis dioica L.	Ranunculaceae	Barba de viejo	Bejuco
Karwinskia humboldtiana (Roem. Et Schult.) Zucc.	Rhamnaceae		Arbusto
Zizyphus amole (S. & M.) J.M. Johast	Rhamnaceae	Corongoro	Arbusto
Zizyphus mexicana Rose	Rhamnaceae		Arbusto
Chiococca alba (L.) Hitch.	Rubiaceae	Chivilla	Arbusto
Exostema caribaeum (Jacq.) Roem. & Schult.	Rubiaceae	Quina	Árbol
Guettarda elliptica Sw.	Rubiaceae		Árbol
Hintonia standleyana Bullock	Rubiaceae	Lechosillo	Árbol
Randia capitata DC.	Rubiaceae	Crucillo	Arbusto
Randia laetevirens Standl.	Rubiaceae	Chicumpe	Arbusto

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

Randia laevigata Standl.	Rubiaceae	Crucillo	Arbusto
Randia tetraacantha (Cav.) DC.	Rubiaceae	Crucillo	Arbusto
Randia thurberi S. Watson	Rubiaceae	Crucillo chino	Arbusto
Randia watsoni Rob.	Rubiaceae		Arbusto
Randia sp.	Rubiaceae	Crucillo grande	Árbol
Casimiroa edulis La Ilave & Lex.	Rutaceae	Sapote blanco	Árbol
Salix chilensis Molina	Salicaceae	Sauce	Árbol
Cadiospermum halicacabum L.	Sapindaceae	Farolito	Bejuco
Cupania dentata Moc. & Sessé	Sapindaceae	Quiebrahacha	Árbol
Paullinia puscens Kunth.	Sapindaceae	3x	Liana
Paullinia sessiliflora Radlk.	Sapindaceae	Pinzancillo	Arbusto
Sapindus saponaria L.	Sapindaceae	Charapo	Árbol
Serjania brachycarpa A. Gray	Sapindaceae	3x chica	Liana
Serjania brachystachya Radlk.	Sapindaceae	3x	Liana
Serjania racemosa K. Schum	Sapindaceae		Bejuco
Thounidium decandrum (Humb. & Bonpl.) Radlk.	Sapindaceae	Charapillo	Árbol
Thouinia paucidentata Radlk.	Sapindaceae		Árbol
Sideroxylon capiri A.DC.	Sapotaceae	Capiri	Árbol
Selaginella sp.	Selaginellaceae	Flor de tierra	Herbácea
Datura discolor Bernh	Solanaceae	Toloache	Rastrera
Lycianthes lenta (Cav.) Bitter	Solanaceae	Frutilla	Herbácea
Solanum grayi Rose	Solanaceae	Mala mujer	Arbusto
Solanum mitlense Dunal. E. Martinez	Solanaceae	Tomatillo negro	Herbácea
Solanum nigrescens M. Martens & Galeotti	Solanaceae	Hierba mora	Herbácea
Byttneria aculeata (Jacq.)	Sterculiaceae	Cola de iguana	Bejuco

La contribución de los atributos del relieve para explicar la distribución espacial de la vegetación: estudio de caso en una zona de montaña de alta diversidad

ANEXOS

Guazima ulmifolia (Lam.)	Sterculiaceae	Guacima	Árbol
Melochia tomentosa L.	Sterculiaceae	Guacimilla	Arbusto
Melochia pyramidata L.	Sterculiaceae	Huinar	Arbusto
Waltheria americana L.	Sterculiaceae	Tapa cola	Arbusto
Recchia mexicana Moe. & Sessé ex DC.	Surianaceae		Arbusto
Heliocarpus donnell-smithii Rose	Tiliaceae	Cicuito rojo	Árbol
Heliocarpus occidentalis Rose	Tiliaceae	Cicuito blanco	Árbol
Heliocarpus pallidus Rose	Tiliaceae	Cicuito	Árbol
Lueha candida Willd.	Tiliaceae	Algodoncillo	Árbol
Lueha speciosa Willd.	Tiliaceae	Murciegalillo	Árbol
Triumpheta sp.	Tiliaceae		Bejuco
Jacquinia pungens A. Gray.	Teophrastaceae		Arbusto
Celtis iguaneus (Jacq.) Sarg.	Ulmaceae	Laurel	Árbol
Trema micrantha (L.) Blume	Ulmaceae	Capulin	Árbol
Lantana camara L.	Verbenaceae.	Trompetilla	Herbácea
Lippia umbellata Cav.	Verbenaceae.	Oreganillo	Arbusto
Phyla nodiflora L.	Verbenaceae.	Hierba buenilla	Herbácea
Vitex Mollis Kunth.	Verbenaceae.	Atuto	Árbol
Vitex pyramidata Rob.	Verbenaceae	Atuto	Árbol
Guaiacum coulteri A. Grey	Zygophyllaceae	Guayacan	Árbol

Clase Liliopsida

Xanthosoma robustum(Schott)	Arecaceae		Arbusto
Bromelia karatas L.	Bromeliaceae	Timbiriche	Arbusto
Hechtia lundelliorum L.B. Smith.	Bromeliaceae		Epifita
Dioscorea Spiculiflora Hemsl.	Dioscoriaceae	Camote de jabali	Bejuco
Hymenocallis proterantha Bauml.	Liliaceae	Flor de santo	Herbácea
Encyclia meliosma (Rch.F.) Schtr.	Orchidaceae		Epifita
Lasiacis ruscifolia (Kunth.) Hitchc.	Poaceae	Carricillo	Arbusto
Muhlebergia sp	Poaceae	Liendilla	Arbusto