

Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México

Recibido: 17 de septiembre de 2007. Aceptado en versión final: 8 de mayo de 2008.

Álvaro Vega Guzmán*

José López-García*

Lilia de Lourdes Manzo Delgado*

Resumen. Aplicando técnicas de clasificación digital y visual sobre imágenes de satélite Landsat ETM+, del 21 de marzo del 2000, se elaboró la cartografía de vegetación y uso del suelo del Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos-México, integrado por el Área de Protección de Flora y Fauna Chichinautzin y por los Parques Nacionales Lagunas de Zempoala y El Tepozteco. Se realizó una clasificación supervisada cuyos resultados fueron validados con puntos de referencia obtenidos mediante trabajo de campo e interpretación de fotografías aéreas digitales de noviembre de 2000, con una resolución espacial de dos metros. La clasificación visual se estableció mediante una matriz de confusión que calculó la precisión comparando las categorías finales de vegetación

y uso del suelo con nuevos puntos de referencia obtenidos de fotografías aéreas digitales escala 1:10 000.

Dado que durante el proceso de una interpretación visual de imágenes de satélite se integran elementos y criterios de referencia inherentes a los conocimientos y habilidades de la persona que realiza el trabajo, es recomendable realizar una interpretación visual posterior a una clasificación digital, pues con ello se reduce el margen de error del producto deseado y en consecuencia aumenta su precisión y confiabilidad.

Palabras clave: Chichinautzin, percepción remota, clasificación visual, vegetación, uso del suelo.

Spectral and visual analysis of vegetation and land use with Landsat ETM+ images assested by digital aerial photography, of the Chichinautzin Biological Corridor, Morelos, Mexico

Abstract. A vegetation and land use map was created through both visual and digital interpretation, of Landsat ETM+ images (March 21st, 2000), of the Chichinautzin Biological Corridor (States of Morelos and Mexico). The Corridor comprises the Chichinautzin Flora and Fauna Protection Area, as well as the Tepozteco and Lagunas de Zempoala National Parks. A supervised classification was validated by field sampling as well as by interpretation of

digital aerial photographs (two meters per pixel) taken on November 2000. The accuracy of the visual interpretation was determined using a confusion matrix which compares the resulting land use and vegetation classes, with new reference points obtained from digital aerial photographs printed at 1:10 000 and field work.

Since the process of visual interpretation of satellite imagery incorporates reference elements and criteria that are

*Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: jlopez@igg.unam.mx.

inherent to the knowledge and capabilities of the interpreter, it is advisable to perform such a visual interpretation, supported by digital aerial photographs, following an automated classification, because this reduces the error margin and thus enhances the accuracy and reliability of the products.

Key words: Chichinautzin, remote sensing, visual classification, vegetation, land use.

INTRODUCCIÓN

El Corredor Biológico Chichinautzin es un Área de Protección de Flora y Fauna, decretada por ser la zona de recarga de acuíferos más importante del estado de Morelos, limítrofe entre el Distrito Federal y el estado de Morelos. Es la única Área Natural Protegida (ANP) que incluye dos Parques Nacionales (Lagunas de Zempoala y El Tepozteco), unidos por un Área de Protección de Flora y Fauna (Corredor Biológico Chichinautzin). Ostenta una superficie de 65 722.00 ha de las cuales 37 873.81 fueron decretadas como Área de Protección de Flora y Fauna Silvestre el 5 de diciembre de 1988 (*Diario Oficial de la Federación*, 1988) y modificada en septiembre del 2000, incluyen 4 561.75 ha del Parque Nacional Lagunas de Zempoala (*Diario Oficial de la Federación*, 27 de noviembre de 1936) y 23 286.51 del Parque Nacional El Tepozteco (*Diario Oficial de la Federación*, 22 de enero 1937).

Políticamente incluye los municipios de Cuernavaca, Huitzilac, Jiutepec, Tepoztlán, Tlalnepantla, Totolapan, Tlayacapan, Atlatlahucan y Yautepec en el estado de Morelos y las Delegaciones políticas de Milpa Alta y Tlalpan al sur del Distrito Federal y Ocuilán de Arteaga en el Estado de México (*Diario Oficial de la Federación*, 1988).

Aun considerando su importancia ecológica no se cuenta con cartografía actualizada de vegetación y uso del suelo, por lo que el objetivo principal fue la elaboración de la cartografía utilizando técnicas de percepción remota, a partir de un análisis complementario de imágenes de satélite y fotografías aéreas digitales y validación con trabajo de campo, con base en la aplicación conjunta de una clasificación supervisada y posteriormente una clasificación visual para mejorar los resultados en la elaboración de cartografía.

ANTECEDENTES

El Corredor Biológico Chichinautzin se localiza en la porción central de la República Mexicana, en el norte del estado de Morelos y una pequeña parte en el Estado de México, en la vertiente sur del Sistema Volcánico Transversal, entre los paralelos 18° 53' 21" y 19° 07' 50" de latitud norte y los meridianos 98° 51' 56" y 99° 21' 02" de longitud oeste; mantiene un rango altitudinal que oscila entre los 1 250 y los 3 600 m (Figura 1). Está integrado por tres Áreas Naturales Protegidas: la primera de ellas, con la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna, denominada Corredor Biológico Chichinautzin, sirve de barrera a la conurbación de las manchas urbanas del norte de Morelos y sur del Distrito Federal, y establece la continuidad de los procesos ecológicos y evolutivos de la biota, además de proteger la zona intermedia entre los Parques Nacionales Lagunas de Zempoala y El Tepozteco (INE, 2000) es, además, una importante zona de recarga de acuíferos del estado de Morelos.

El Corredor Biológico Chichinautzin se integra por tres zonas núcleo que cubren el 14.47 % de sus 37 302 ha totales; son áreas poco alteradas, donde sus ecosistemas son el hábitat de especies de flora y fauna silvestre que es necesario proteger, ya que ostenta algunas especies endémicas o en peligro de extinción.

Las zonas núcleo son: A. Chalchihuites, cuya superficie es de 783.14 ha, B. Chichinautzin-Quiahuistepec con 2 873.11 ha y C. Las Mariposas, con una extensión de 1 740.86 ha (Figura 2). La superficie restante (31 905.28 ha) es denominada zona de amortiguamiento y su objetivo es el de proteger y reducir el impacto en las zonas núcleo. Aquí se realizan diversas actividades productivas tales como agricultura de temporal, ganadería y explotación forestal. Se realizan también actividades recreativas, educativas y de investigación (LGEEPA, 1988). El corredor biológico se ubica en la sierra Chichinautzin, que representa una zona de volcanes jóvenes con promedio de hasta 120 unidades por cada mil kilómetros cuadrados (Lugo *et al.*, 1985) y una edad menor de 50 000 años (Martín del Pozzo, 1990). Por otro lado, Fries (1960) definió a la sierra

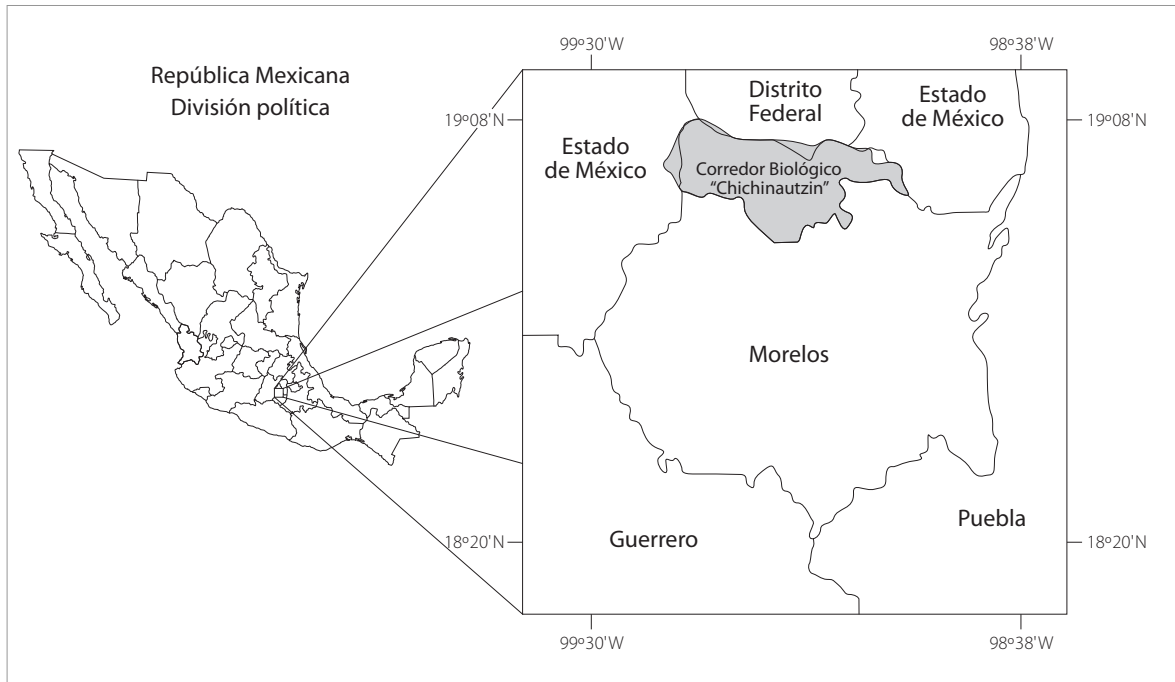


Figura 1. Localización del Corredor Biológico Chichinautzin.

como todas las corrientes lávicas, tobas, brechas y materiales clásticos interestratificados, depositados por agua, de composición andesítica o basáltica que descansan encima de la Formación Cuernavaca o de unidades más antiguas. Él mismo define tres tipos de volcanes presentes: de lava, conos de escoria y domos de lava.

Los ríos Yautepec y Apatlaco establecen el balance hídrico de la zona, mantienen su recarga producto de las precipitaciones de verano que llegan a alcanzar más de los 1 200 mm anuales en los límites superiores del municipio de Huitzilac, mientras que en el resto de los municipios del corredor se han registrado entre 900 y 1 200 mm medios anuales (UAM-UAEM, 1990), dando como resultado una importante zona de recarga de los mantos acuíferos, ya que por su ubicación dentro de la Sierra Chichinautzin es una de las áreas con mayor capacidad de infiltración en el estado, 70-80 % (*Ibid.*), misma que permite que con el aprovechamiento de estos acuíferos se desarrollen las actividades económicas y domésticas de la región.

Las unidades edáficas presentes son muy variadas, según Martínez (2003), el Corredor Biológico

Chichinautzin presenta 14 unidades de suelos representados por cuatro consociaciones y diez asociaciones, en cinco órdenes según el sistema americano (Soil Taxonomy), denominados como: Entisoles, Inceptisoles, Andisoles, Molisoles y Vertisoles. Desde el punto de vista climático en las partes más altas se presenta un clima semi-frío, mientras que sitios con altitudes que oscilan entre los 2 000 y 3 000 m, mantienen un clima templado; en la porción baja a menos de 2 000 m, el clima es semi-cálido.

METODOLOGÍA

Se utilizaron fotografías aéreas analógicas (pan-cromáticas) y digitales (color); las primeras fueron obtenidas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en abril de 1993; 15 líneas de vuelo cubren en su totalidad el área en estudio a una escala promedio de 1:20 000. Las segundas se adquirieron el 26 de noviembre de 2001 por el Instituto de Geografía de la UNAM; doce líneas de vuelo, con promedio de 38 fotografías

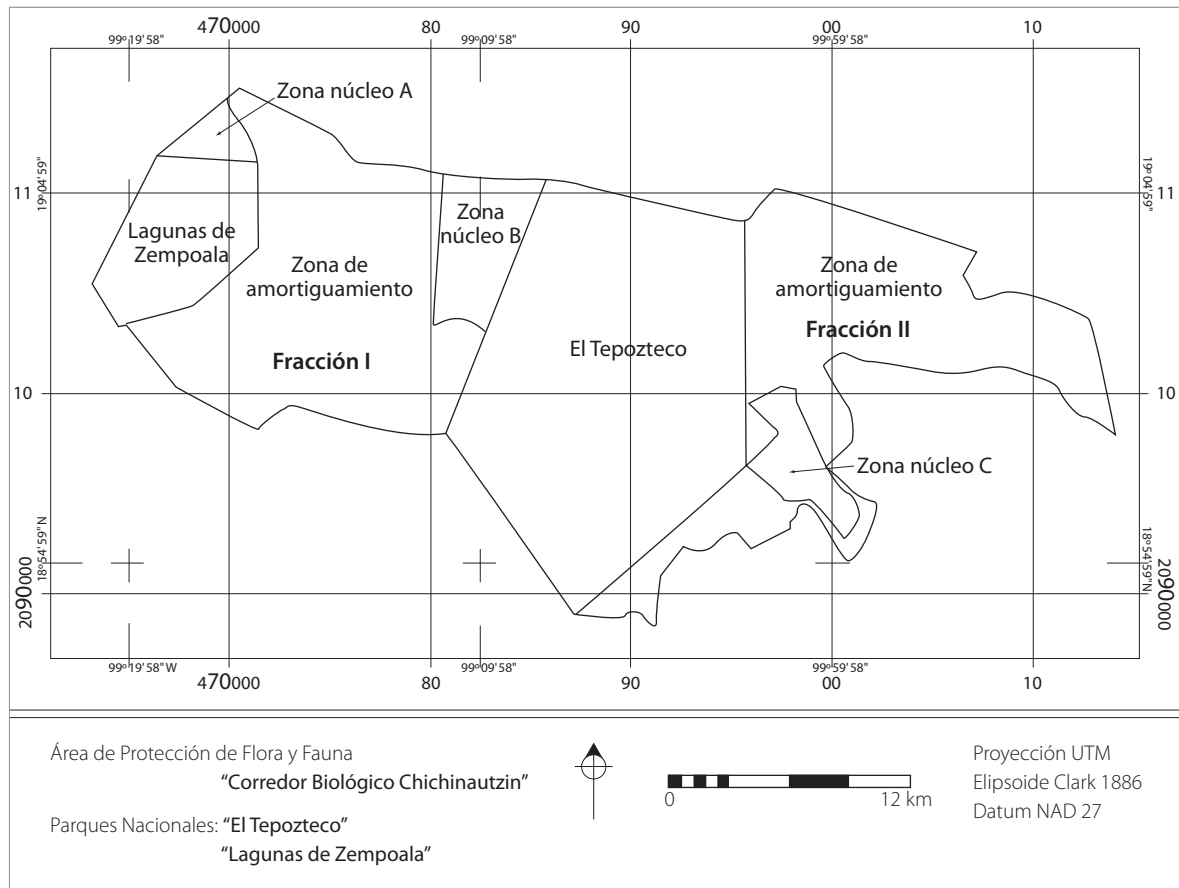


Figura 2. Corredor Biológico Chichinautzin.

por línea, cubren la región noreste del corredor a una escala promedio de 1:10 000.

Las imágenes de satélite contienen los datos adquiridos por el satélite Landsat ETM+. De este conjunto de datos se realizó un recorte de la zona en estudio, obteniéndose para el caso de las imágenes del espectro visible e infrarrojo cercano 1 025 líneas y 1 835 columnas. Fueron georreferenciadas tomando como base la proyección UTM y considerando el elipsoide de Clarke de 1866 y el datum NAD27. Los límites del recorte corresponden a las coordenadas geográficas 18°52'15" y 19°08'55" de latitud norte y, 98°50'46" y 99°22'09" de longitud oeste. Con fines prácticos de cuantificación y para realizar sobre ella los análisis pertinentes, se elaboró un recorte correspondiente a los límites administrativos del Corredor Biológico Chichinautzin.

Definición de los límites

La definición de los límites se realizó considerando las coordenadas de los vértices establecidos en los decretos publicados en el *Diario Oficial de la Federación* para cada una de las áreas naturales protegidas que la integran. Fueron elaborados con ayuda de los sistemas de información geográfica AutoCad Map 2000 e ILWIS 3.0. Al ser elaborados digitalmente y encontrarse sujetos a cálculos precisos, se presenta una discrepancia en los valores de las superficies decretadas y los obtenidos en el sistema digital; lo cual no significa que los valores de las superficies obtenidos digitalmente sean erróneos; en último caso, corresponden a los valores reales de superficie en función de las coordenadas establecidas en los decretos para cada vértice. De esta forma, y dado que es prácticamente imposible ajustar los datos digitales con los datos de superficie establecidos (*Diario Ofi-*

cial de la Federación, 19 de mayo, 1947), el análisis de los resultados se realizó con los datos de superficie que el sistema digital calculó (Tabla 1).

Definición de la leyenda

La leyenda de trabajo (Tabla 2) se estableció en función de los diferentes tipos de vegetación y usos de suelo presentes en el Corredor Biológico Chichinautzin, además de considerar las observaciones realizadas durante los trabajos de campo e interpretación aerofotográfica, considerando las características de la vegetación (Rzedowski, 1983).

Un elemento más en la definición de la leyenda fue la escala de representación, 1:50 000; a esta escala las imágenes Landsat ETM+ pueden ser utilizadas para obtener productos cartográficos, dado que se pueden realizar estudios de áreas urbanas, agricultura y usos del suelo (Sausen *et al.*, 1997).

Fase 1. Clasificación digital

El procesamiento digital de las imágenes se realizó con el software ILWIS 3.0, para lo cual se elaboró una clasificación supervisada con una delimitación vectorial en áreas de entrenamiento y se tomaron puntos y áreas muestra obtenidas en trabajo de campo de los diferentes tipos de vegetación y usos de suelo que existen en el ANP; la determinación de su tamaño fue establecida considerando, por un lado, los resultados de una clasificación no supervisada previa, misma que permitió observar regiones homogéneas de píxeles y, por otro, se utilizó la densidad de las coberturas vegetales, con lo cual se estableció más de un área de entrenamiento y de diversos tamaños para cada tipo de vegetación y uso del suelo.

Para la combinación se usaron dos bandas en la región del infrarrojo del espectro electromagnético, lo que permite apreciar el suelo expuesto, mientras que la infraestructura se visualiza en tonos rosados y azules, respectivamente, y la vegetación se muestra en diversas tonalidades de verde y rosa, que varían en función del tipo y de las condiciones de la misma (*Ibid.*), significando, a su vez, que existe una diferencia en los niveles digitales (ND) de los píxeles y por lo tanto diferentes usos del suelo y tipos de vegetación; las áreas de entrenamiento

fueron registradas sobre una composición en color 543¹ (RGB).

Los píxeles utilizados como áreas de entrenamiento fueron visualizados en una gráfica de características espaciales colocando la banda del visible rojo en el eje vertical y la banda del infrarrojo cercano en el eje horizontal; con ello se logró observar el grado de discriminación entre una clase y otra, e inferir el resultado de la fase de asignación al observar la sobreposición existente entre los píxeles de diferentes clases.

Durante la fase de asignación se aplicó el método de clasificación *Minimum Mahalanobis Distance*, que a partir de los valores medios y de una matriz varianza-covarianza de las respuestas espectrales de las áreas de entrenamiento para cada banda espectral de la composición en color, se eligen aquellos píxeles cuyos ND tengan valores semejantes a los de entrenamiento, y en función de esto se les asigna una de las categorías determinadas en la leyenda de trabajo.

El proceso de clasificación digital fue aplicado sobre el recorte completo de la imagen ya establecida, sin embargo, se utilizó únicamente el polígono correspondiente al área del Corredor Biológico Chichinautzin para realizar los análisis espectrales e incluir únicamente el área de interés y reducir, de esta manera, la desviación de valores ajenos al área en estudio que podrían modificar los resultados.

¹ Para el caso de las imágenes ETM+, son seis el número de bandas que generalmente se utilizan para obtener productos temáticos, tres del espectro visible y tres del infrarrojo, por lo que la combinación de ellas en el sistema RGB puede ser variado dependiendo del objetivo del trabajo. Para conocer el número de bandas que se ha utilizado en una composición en color, se utiliza generalmente la siguiente nomenclatura: Imágenes ETM+, composición en color 543. R: Rojo para la banda 5, infrarrojo medio; G: Verde para la banda 4, infrarrojo cercano; B: Azul para la banda 3, rojo visible. Lo anterior quiere decir que el software realizará una combinación de tres colores entre los píxeles de la bandas seleccionadas, así, los píxeles de la banda 5 que registraron la longitud de onda del infrarrojo medio se visualizarán en la gama del color rojo, mientras que los píxeles que registraron las longitudes de onda del infrarrojo cercano y rojo, bandas 4 y 3, respectivamente, serán visualizados en tonos verde y azul.

Tabla 1. Comparación entre los datos de superficie decretada y los obtenidos con el sistema digital

Área Natural Protegida	Zona	Superficie establecida por decreto (ha)	Superficie calculada digitalmente (ha)
Área de Protección de Flora y Fauna Corredor Biológico Chichinautzin	Núcleo Chalchihuites	783.14	777.72
	Núcleo Chichinautzin-Quiahuiestepec	2 873.11	2 868.43
	Núcleo Las Mariposas	1 740.86	1 745.74
	Amortiguamiento Fracción I y II	31 905.28	32 002.72
Parque Nacional Lagunas de Zempoala		4 790.00	4 795.57
Parque Nacional El Tepozteco		24 000.00	21 961.02
Total		66 092.39	64 151.20

Los recorridos de campo permitieron recabar 189 puntos de reconocimiento, en donde se conoce con exactitud el tipo de vegetación, y fueron utilizados como campos de entrenamiento. Por otro lado, se utilizó la ventaja espacial de las fotografías aéreas digitales de 1 m² por píxel y se seleccionaron 281 puntos de las fotografías, en donde se visualizó inequívocamente el tipo de vegetación, al correlacionarlos con los muestreos de campo, validando de esta manera la fotointerpretación, dando un total de 470 campos de entrenamiento que validaron la cartografía.

La clasificación digital fue sujeta a un análisis de fiabilidad para estimar la precisión de los resultados de este proceso; se realizó una matriz de confusión en la cual se compararon los puntos

de reconocimiento de campo y los derivados de la interpretación estereoscópica de fotografías aéreas digitales. Se rasterizaron a una resolución de 30 m y se estableció una superficie de 90x90 m (3x3 píxeles) dado que en el trabajo de campo y fotointerpretación fueron elegidas áreas que superaban estas superficies.

La leyenda fue homogeneizada para establecer la matriz de confusión en los campos de entrenamiento, con la leyenda de vegetación y usos del suelo propuesta, para ello, las categorías asignadas en la clasificación digital correspondían a un solo tipo de vegetación o uso del suelo; de esta manera se comparó el mismo número y nombre de categorías, tanto para la clasificación digital como para los puntos muestra. Se obtuvo así, una primera matriz de confusión denominada: puntos de campo y fotointerpretación-clasificación digital.

Tabla 2. Leyenda vegetación y uso del suelo

Vegetación y uso del suelo	
BO	Bosque de Oyamel
BP	Bosque de Pino
BE	Bosque de Encino
BM	Bosque Mixto
BTC	Bosque Tropical Caducifolio
BQ-BTC	Bosque de Encino - Bosque Tropical Caducifolio
MC	Matorral Crassirosulifolio
AGP	Agricultura y Pastizal
IF	Infraestructura
AR	Afloramientos Rocosos

Fase 2. Interpretación visual de las imágenes

La clasificación digital fue corregida visualmente al establecer la fiabilidad del proceso de clasificación digital, tomando como elementos de referencia para la interpretación visual, los errores de la clasificación, los puntos muestra de campo, la fotointerpretación, el trabajo de campo y los parámetros de clasificación de la vegetación según Rzedowski (1983).

De esta manera las unidades fueron reclasificadas a una categoría más precisa, considerando aquellos píxeles que contenían un atributo diferente al observado en campo o en las fotografías aéreas o viceversa. De igual forma, algunas regiones cuya

clasificación no correspondió con los parámetros establecidos por Rzedowski (1983) y que a su vez coincidieron con observaciones de campo, fueron reinterpretados a una categoría más adecuada.

En esta etapa del trabajo fue considerada la escala de representación del mapa final 1:50 000 y, en función de ello, se asignaron algunas superficies inferiores al área mínima cartografiable a la categoría dominante; considerando que varios autores (Chuvieco, 2000 y Anderson *et al.*, 1976) recomiendan que el área mínima cartografiable no sea inferior a 4 mm² (2 x 2 mm), medidos a escala del mapa, a escala 1:50 000, equivalen a una hectárea y, considerando la resolución espacial de las imágenes ETM+ (30 x 30 m), se eliminaron polígonos que tuvieran una superficie menor de 3 x 3 píxeles (90 x 90 m), es decir, categorías que tuvieran menos de nueve píxeles de superficie aproximadamente.

Se incluyó, durante la interpretación visual, la categoría bosque de encino-bosque tropical caducifolio, debido a que las observaciones de campo e interpretación fotográfica permitieron discriminar estos tipos de vegetación, cosa que no sucedió en la clasificación digital.

La primera prueba de fiabilidad del mapa final se realizó con una comparación visual con la composición en color, mediante la sobreposición vectorial de los polígonos de vegetación y usos del suelo, en la composición en color, observando la correspondencia cromática de la imagen con la separación de unidades vegetales y de usos del suelo.

El cálculo estadístico de la precisión del mapa final –vegetación y usos del suelo del Corredor Biológico Chichinautzin– se hizo mediante la elaboración de una nueva matriz de confusión denominada puntos de fotointerpretación-clasificación visual, utilizando 203 nuevos puntos muestra rasterizados a 30 m y de una superficie de 90 x 90 m (3 x 3 píxeles).

RESULTADOS

El 69.24 % del Corredor Biológico Chichinautzin presenta cobertura forestal, lo que le da importancia desde el punto de vista de conservación de recursos

naturales. Los bosques de coníferas representados por oyamel (*Abies religiosa*); pino (*Pinus teocote*, *P. Montezumae*, *P. Pseudostrobus*, *P. Leyophila*, *P. Rudis*, *P. Hartwegii*, *P. Lawsoni*), cubren una superficie de 16 286.65 ha, que representa 25.39 % y los bosques de latifoliadas caracterizados por bosque de encino (*Quercus rugosa*, *Q. microphila*, *Q. candicans*, *Q. castanea*, *Q. hartwegii*, *Q. obtusata*, *Q. laurina*, *Q. diversifolia*, *Q. acutifolia*, *Q. conglomerata*); la selva baja caducifolia (*Lysiloma acapulcensis*, *L. divaricata*, *Ceibaesculifolia*, *Ipomea murucoides*, *Juglans mollis*, *Trichilia hirta*, *T. pringlei*, *Bursera copallifera*, *B. glabrifolia*, *B. fagaroides*, *Heliocarpus terebinthinaceus*, *Leucaena microphylla* y *Ficus sp.*) ostentan una superficie de 20 972.24 ha, equivalente al 32.69 % del total del ANP, mientras que el bosque mixto caracterizado por diversas especies de pino, encino y otras latifoliadas (*Arbutus xalapensis*, *Juniperus flaccida*, *Ternstroemia pringlei*) mantiene el 11.16 % de superficie que equivalen a 7 159.14 ha (Figura 3).

Por otro lado, el 2.18 % está compuesto por matorrales crassirosulifolios (*Hechita podantha*, *Agave horrida*, *Sedum oxypetalum*, *Echeverría gibbiflora*, entre otras) y afloramientos rocosos, el 26.58 % son áreas dedicadas a actividades productivas de carácter agropecuario y la infraestructura ocupa sólo el 1.99 % del ANP (Tabla 3).

La cartografía obtenida mediante el procesamiento digital y visual de las imágenes Landsat ETM+ del 21 de marzo del 2000, muestra la localización y distribución de la vegetación y uso del suelo en el área denominada Corredor Biológico Chichinautzin (Figura 4).

Fase 1 Clasificación digital

Se aplicó el método clusters con una combinación en color 432. Se realizaron pruebas que abarcaron rangos de tres hasta quince clases, en las cuales se observó que las clasificaciones realizadas por debajo de una asignación de siete clases, no diferenciaban entre cubiertas totalmente diferentes, es decir, generalizaban las cubiertas presentes, por ejemplo, la categoría agropecuario se etiquetaba como infraestructura o viceversa, o bien, cubiertas muy diferenciadas, como la vegetación, incluía píxeles que en realidad se observaban desprovistos

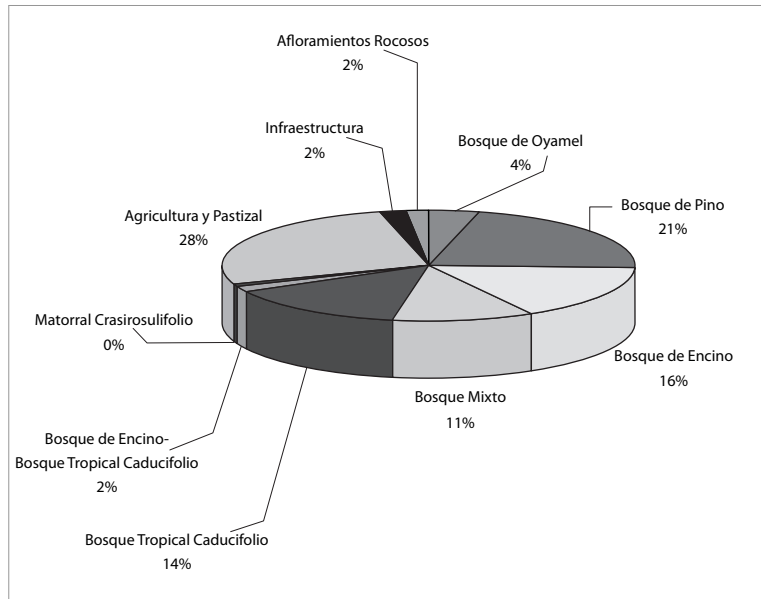


Figura 3. Porcentaje de vegetación y uso del suelo.

de vegetación. Por el contrario, clasificaciones por arriba de siete clases fragmentaban demasiado las cubiertas, teniendo así, una serie de subcategorías por cada categoría distinguible visualmente en la composición en color, provocando con ello que no se apreciaran de forma clara los principales usos del suelo.

Tabla 3. Vegetación y uso del suelo del Corredor Biológico Chichinautzin

Vegetación y uso del suelo	ha	%
Bosque de Oyamel	2 569.37	4.01
Bosque de Pino	13 717.28	21.38
Bosque de Encino	10 477.45	16.33
Bosque Mixto	7 159.14	11.16
Bosque Tropical Caducifolio	9 259.12	14.43
Bosque de Encino-Bosque Tropical Caducifolio	1 235.67	1.93
Matorral Crasirosulifolio	276.55	0.43
Agricultura y Pastizal	17 051.78	26.58
Infraestructura	1 279.63	1.99
Afloramientos Rocosos	1 125.21	1.75
Total	64 151.20	100.00

La clasificación no supervisada de siete clases permitió observar un punto medio entre la generalización y la fragmentación de las clases, y establecer, así, zonas homogéneas de algunas categorías de uso del suelo y vegetación. La selección de áreas de entrenamiento para elaborar la clasificación supervisada fue realizada considerando para cada tipo de cobertura diferentes subcategorías.

Para cubrir todas las posibilidades de identificación de los tipos de vegetación durante la clasificación digital, y abarcar una gama más amplia de áreas de entrenamiento, se consideraron tanto la fragmentación como la diversidad de coberturas vegetales. Se observó que debido a estos factores la respuesta espectral variaba entre elementos de la misma clase localizados en distintas regiones. Visualmente la variación cromática observada en la composición en color mostró que, tanto la fragmentación como la densidad de cobertura aparente, influían en diversos elementos de la superficie terrestre que, aunque siendo los mismos, se observaban como pertenecientes a otras clases.

Pese a tener imágenes libres de nubes se identificaron, en la ladera norte de algunas elevaciones, regiones de tonalidad oscura, mismas que fueron asociadas a sombras provocadas por la orografía de la región. Considerando esto, se logró obtener diferentes subcategorías de un mismo tipo de

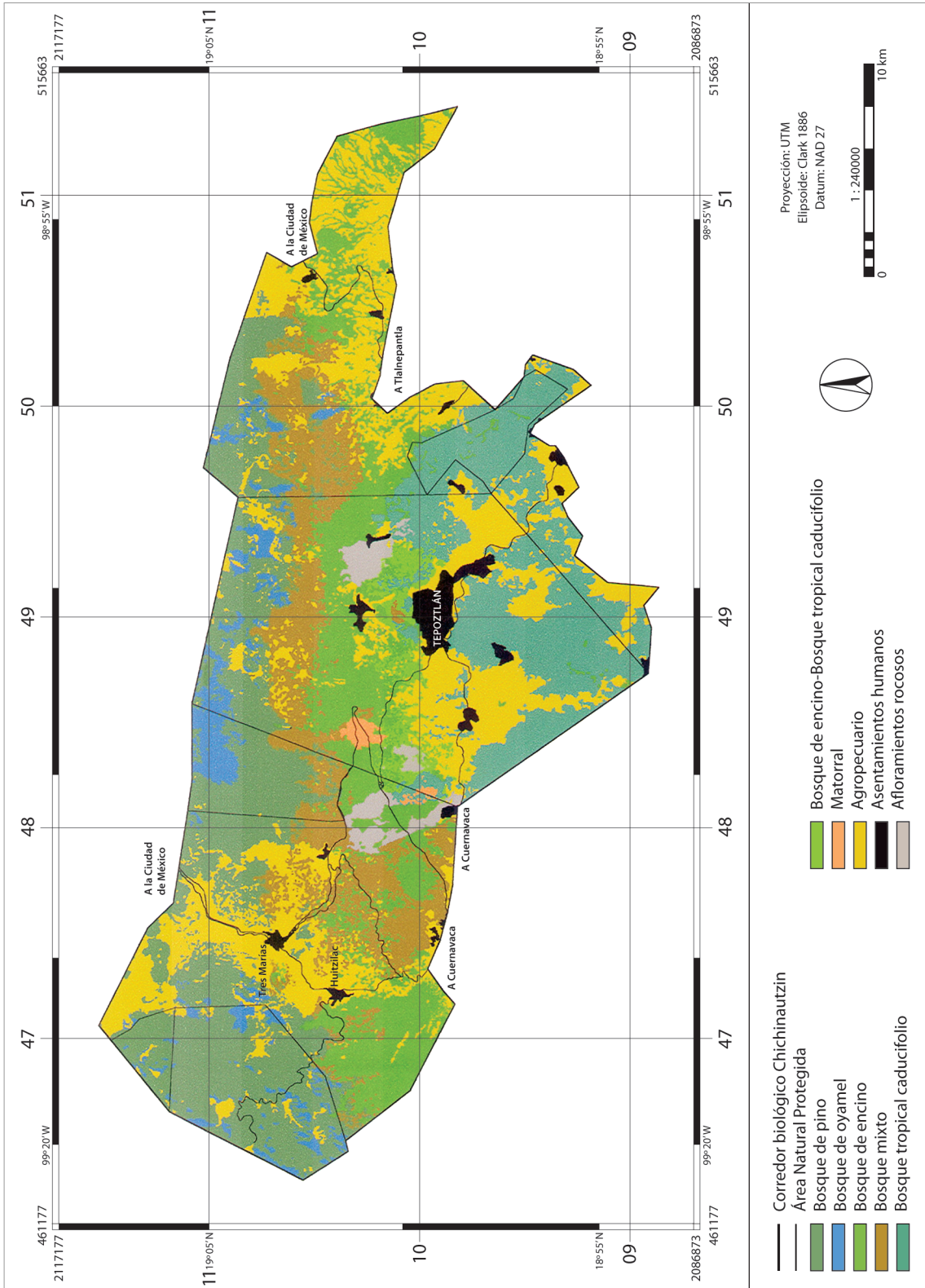


Figura 4. Vegetación y uso del suelo del Corredor Biológico Chichinautzin.

vegetación o uso del suelo durante la selección de las áreas de entrenamiento.

La humedad fue, también, un elemento a considerar en la diferenciación de algunas coberturas vegetales. La imagen fue adquirida en el mes de marzo, época seca del año, por lo que se sabía que el bosque tropical caducifolio tendría un aspecto seco dada su condición fenológica; por el contrario, se observó, al sobreponer un mapa de mesoclimas sobre la imagen, que los encinares se localizaban en la franja más húmeda del corredor, misma que en la composición en color presentaba una coloración muy distintiva. Por otro lado, los campos de cultivo presentaban diferentes tonalidades cromáticas, semejándose a elementos de infraestructura principalmente, que bien podía ser producto de su alto contenido de humedad, o bien, por su probable baja humedad se confundía con el bosque tropical caducifolio.

Considerando los criterios anteriores, además de las regiones homogéneas identificadas en la clasificación no supervisada y las observaciones realizadas en los trabajos de campo, se registraron diversas subcategorías por cada categoría de vegetación y

uso del suelo para abarcar la variabilidad espectral y cromática de cada una de ellas (Tabla 4).

Registrados los píxeles de entrenamiento correspondientes a las diversas categorías de cada clase establecida, se elaboró la gráfica de características espaciales de los mismos, donde se integraron las subcategorías a una sola (Figura 5).

La gráfica mostró que dos de las bandas utilizadas para la clasificación supervisada discriminaron de forma correcta cada una de las categorías establecidas, dado que se observaron nubes de píxeles relativamente homogéneas por cada categoría; si bien existió sobreposición entre categorías, como la de bosque de pino y bosque mixto o la de infraestructura, agricultura y pastizal, se debió a los factores considerados en la selección de las áreas de entrenamiento.

Se pudo apreciar que uno de los usos del suelo que mayor dificultad tuvo para su clasificación digital fue el bosque mixto, ya que los valores de los píxeles seleccionados para discriminar esta clase se encontraron mezclados entre los ND del bosque de pino, con ello se pudo inferir que aunque su discriminación fuera correcta, existirían píxeles de

Tabla 4. Categorías y criterios utilizados para la selección de áreas de entrenamiento

Categoría principal	Sub categoría	Áreas de entrenamiento	Factores que influyen en la división de la categoría
Bosque de Oyamel	2	8	Sombras, coberturas cerradas y semicerradas, asociación con pino
Bosque de Pino	3	11	Fragmentación, cobertura cerrada, semicerrada y abierta
Bosque de Encino	3	12	Fragmentación, cobertura cerrada, semicerrada y abierta, humedad
Bosque Mixto	1	7	Cobertura, asociación vegetal
Bosque Tropical Caducifolio	3	27	Condición fenológica, fragmentación
Matorral Crassirosulifolio	1	3	Respuesta espectral
Agricultura y Pastizal	8	68	Tipo de cultivo, humedad, observación de campo
Infraestructura	2	16	Trama, densidad de construcciones, caminos, sombras
Afloramientos Rocosos	1	3	Forma, respuesta espectral
Invernadero	1	2	Tono, respuesta espectral
Total	25	157	

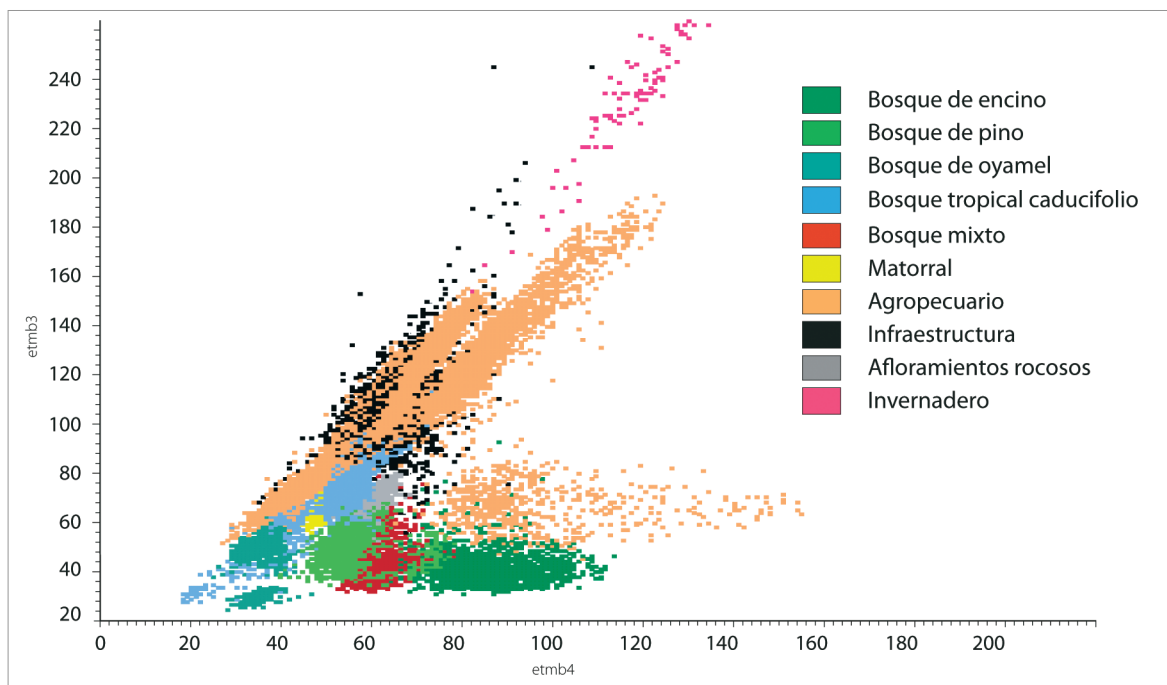


Figura 5. Características espaciales de las áreas de entrenamiento seleccionadas.

bosque mixto que se clasificarían como pinares o píxeles correspondientes a bosque de pino que se clasificarían como bosque mixto. Por el contrario, una de las clases que supuso pocos problemas para su clasificación fue el bosque de encino, pues entre los ND de los píxeles que representaron esta clase y otras, existió poca sobreposición.

El bosque tropical caducifolio y el bosque de oyamel mantuvieron algunos píxeles sobrepuestos con otras categorías, sin embargo, se pudo inferir que serían discriminados correctamente en la clasificación, pues los píxeles mantuvieron nubes homogéneas.

La categoría agropecuario se entremezcló con varias categorías (bosque de encino, infraestructura y bosque tropical caducifolio), lo cual supuso que algunos píxeles que no correspondían a la categoría agricultura y pastizal serían clasificados como tal. Píxeles catalogados como matorral crasirosulifolio y afloramientos rocosos mantuvieron una separación distintiva en ambas bandas pese a ubicarse en la gráfica entre nubes de píxeles de otras categorías.

Durante la clasificación digital se incluyó la categoría invernadero, ya que estas construcciones

fueron de fácil identificación por este método, así, las zonas de entrenamiento para esta categoría representaron nubes de píxeles cuyos ND fueron muy distintivos.

La fase de asignación fue realizada sobre la composición en color 543 aplicando el método *Minimum Mahalanobis Distance*. Este método de clasificación le asignó a todos los píxeles que integraron el recorte de la imagen alguna de las categorías establecidas, por lo que ninguno de ellos se quedó sin ser clasificado (Figura 6).

Además de los puntos obtenidos en campo, se utilizaron fotografías aéreas digitales para ampliar el número de puntos muestra; durante su adquisición se obtuvo un mayor grado de referencia espacial de la distribución de los tipos de vegetación y usos del suelo en el corredor, que posteriormente sirvió para elaborar con mayor precisión la interpretación visual. El total de puntos muestra de referencia, considerando los de trabajos de campo y los obtenidos mediante fotointerpretación, sumaron un total de 470 (Tabla 5).

La coincidencia entre puntos de referencia y clasificación supervisada tuvo una precisión global

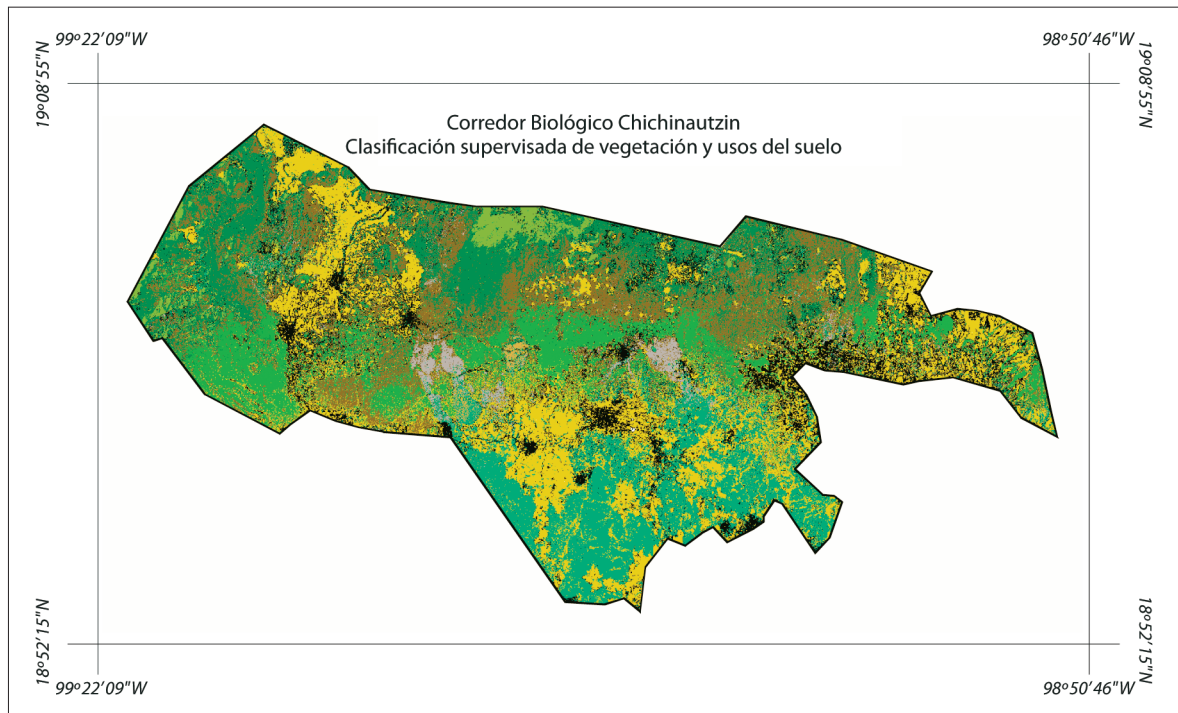


Figura 6. Clasificación supervisada utilizando el método *Minimum Mahalanobis Distance*.

de aproximadamente 76 %, que resulta baja considerando a Anderson, (1976), quien sugiere que la exactitud global de la clasificación debe ser de al menos un 90 % y que dicha exactitud debe ser similar para todas las categorías utilizadas (Tabla 6).

La precisión de cada categoría estuvo por arriba del 70 %, excepto para el bosque de pino (63 %), cuyo problema de discriminación fue la confusión de sus ND con los del bosque mixto. Por otro lado, como se mencionó en el análisis de la gráfica de características espaciales, el bosque de encino fue una de las coberturas que menores problemas tuvo para su clasificación con un 83 % de precisión, es decir, que del total de píxeles con esa categoría, un 83 % coincidió con los píxeles clasificados como tal, mientras que el resto de píxeles fueron clasificados erróneamente en otra categoría, sobre todo en la de bosque mixto. De la misma manera, el bosque mixto fue la categoría que más errores de comisión tuvo, es decir, píxeles que siendo clasificados como bosque mixto pertenecían realmente a otra categoría, sobre todo bosque de pino; esto mismo provocó que los pinares tuvieran el menor porcentaje en

precisión, 63 %, dado que 168 píxeles clasificados como bosque mixto, pertenecían a la categoría de bosque de pino.

La categoría agropecuario, cuya precisión fue de 72 %, mostró la dificultad que tuvo el clasificador para su discriminación, ya que en la matriz se observa que varios píxeles que debieron tener esta etiqueta fueron clasificados como infraestructura o bosque tropical caducifolio principalmente, sin dejar de lado que su confusión abarca todas las categorías establecidas, excepto la de invernadero. Los valores de fiabilidad de cada clase, a excepción de las categorías bosque mixto e infraestructura, superaron el 76 % de fiabilidad llegando en el caso de matorral a un porcentaje de 97 %.

El bajo porcentaje de precisión global, y por clase, es explicado considerando que el corredor biológico representa una zona fragmentada en sus coberturas vegetales, mismas que poseen diferentes densidades de cobertura, así, la respuesta espectral capturada por el sensor es muy variada lo que implica, a su vez, que los ND de los píxeles se confundan con categorías muy distintas unas de otras.

Tabla 5. Puntos de referencia obtenidos en el trabajo de campo e interpretación aerofotográfica

Categoría	Puntos de campo	Puntos de fotointerpretación	Número de puntos	Número de Píxeles
Bosque de Oyamel	6	6	22	198
Bosque de Pino	30	42	72	648
Bosque de Encino	24	39	63	567
Bosque Mixto	12	24	36	324
Bosque Tropical Caducifolio	17	35	52	468
Matorral Crassiosulifolio	3	6	9	81
Agricultura y Pastizal	41	73	114	1026
Infraestructura	19	36	55	495
Afloramientos Rocosos	2	9	11	99
Invernadero	2	0	2	18
Total	189	281	470	3924

Si bien la fiabilidad de la clasificación supervisada no alcanzó los valores mínimos mencionados por Anderson *et al.* (1976), se consideró conveniente utilizar esta misma como base inicial para separar, de forma más adecuada a la realidad, mediante interpretación visual, las unidades de vegetación y usos del suelo del Corredor Biológico Chichinautzin.

Fase 2 Reclasificación visual

Para reclasificar a la categoría más adecuada, aquellos píxeles que se incluyeron en una categoría distinta a la que pertenecían, se utilizaron diversos criterios; mediante una diferenciación visual en función del color observado en una composición en color 543 y recorridos de campo; así como los pisos altitudinales de los tipos de vegetación, se logró discriminar el bosque mixto, mismo que se confundía con el bosque de pino y el bosque de encino. De esta forma, píxeles que fueron clasificados digitalmente como bosque mixto fueron reclasificados visualmente a las categorías de bosque de pino.

El bosque de encino fue separado sobreponiendo un mapa de climas sobre la composición en color, para observar la coincidencia que el clima templado húmedo tiene con este tipo de vegetación, de acuerdo con Rzedowski (1983), así se distinguió

una franja verde claro en la composición en color que abarcó un rango altitudinal de 1 900 a 2 500 m, de esta forma, aquellos píxeles que no abarcaron estos criterios fueron asignados a otra categoría más adecuada a sus características. De la misma manera, píxeles que fueron clasificados como bosque tropical caducifolio y que superaban en su localización altitudinal los 1 600 m, fueron reclasificados a la categoría agropecuario, ya que estos dos elementos tendían a confundirse por su respuesta espectral semejante y que se observa en la matriz de confusión, puntos de campo y fotointerpretación-clasificación supervisada.

La categoría infraestructura, por su parte, fue delimitada en función de su apariencia cromática en la composición empleada y, con ello, se reclasificaron como agropecuario o bosque tropical caducifolio aquellos píxeles que no se ubicaban en regiones visualmente urbanas en la composición en color. Tanto el matorral como los afloramientos rocosos fueron delimitados considerando las observaciones de campo y su localización en la clasificación digital, misma que coincidió con las primeras, sin embargo, su confusión con las categorías agropecuario o bosque tropical caducifolio hizo necesario sobreponer en la imagen un mapa de litología y pendientes y así separarlas adecuadamente; dado que existían píxeles aislados etiqueta-

Tabla 6. Matriz de confusión: puntos de campo y fotointerpretación-clasificación supervisada

Categorías		Resultados de la clasificación supervisada										
		Bosque de Encino	Bosque de Pino	Bosque de Oyamel	Bosque Tropical Caducifolio	Bosque Mixto	Matorral Crassirosulifolio	Infraestructura	Agricultura y Pastizal	Afloramientos Rocosos	Invernadero	Precisión
Puntos de referencia	Bosque de Encino	473	21	0	0	38	0	8	27	0	0	83
	Bosque de Pino	16	409	21	4	168	1	19	8	2	0	63
	Bosque de Oyamel	0	36	146	1	1	0	11	3	0	0	74
	Bosque Tropical Caducifolio	12	4	0	349	6	1	9	82	5	0	75
	Bosque Mixto	31	43	0	0	237	0	7	6	0	0	73
	Matorral Crassirosulifolio	0	1	0	20	1	57	1	0	1	0	70
	Infraestructura	5	0	0	4	0	0	393	93	0	0	79
	Agricultura y Pastizal	10	20	4	80	17	0	142	743	10	0	72
	Afloramientos Rocosos	0	0	0	3	7	0	4	0	85	0	86
	Invernadero	0	0	0	0	0	0	4	0	0	14	78
Fiabilidad		86	77	85	76	50	97	66	77	83	100	
Precisión global = 75.93 %												

dos como afloramientos rocosos o matorral, éstos fueron eliminados al considerar el área mínima cartografiable, ya que dichos píxeles no superaban esta superficie.

Este último criterio, área mínima cartografiable, fue considerado al recategorizar aquellos píxeles que formaron polígonos, de cualquier categoría, que no superaron 1 ha, pues no serían representativos espacialmente en una versión analógica del mapa a escala 1:50 000. La categoría invernadero (2.34 ha), aunque fue claramente separable, se anexó para hacer el análisis a la categoría Infraestructura.

Durante la interpretación visual fue incluida la categoría bosque de encino-bosque tropical caducifolio, misma que se observó en los trabajos de campo y fotointerpretación y que no fue incluida en la clasificación digital pues se confundía totalmente con las zonas agropecuarias; identificadas las zonas donde esta unidad se presentaba, se reclasificaron los píxeles establecidos como agricultura y pastizal, infraestructura o afloramientos rocosos a su categoría correcta de bosque de encino-bosque tropical caducifolio. Los cambios sufridos en ambas

clasificaciones, una vez terminada la reinterpretación visual de la clasificación digital, se presentan en el siguiente cuadro comparativo de número de píxeles por categoría (Tabla 7).

Tanto las categorías bosque de encino y bosque de pino, como el bosque de oyamel, aumentaron su porcentaje en cobertura; los dos primeros en aproximadamente 4 % y la segunda en 2 %, mismo que se relaciona con el decremento en cantidad de píxeles de la categoría bosque mixto de aproximadamente 4 %; dicho de otro modo, píxeles etiquetados digitalmente como bosque mixto, visualmente fueron reclasificados como bosque de pino y en menor proporción bosque de encino.

El aumento de la categoría bosque de oyamel se relaciona con el decremento de píxeles etiquetados como infraestructura, pues se observó que los ND de esta última se confundían con los del bosque de oyamel, y mediante interpretación visual se logró hacer una discriminación más adecuada del bosque de oyamel-infraestructura.

Por su parte, se explica el decremento de píxeles en cerca del 10 % de la categoría infraestructura,

Tabla 7. Comparación entre el número de píxeles por categoría, después de la interpretación visual a partir de la clasificación digital

Categoría	Interpretación digital		Interpretación visual	
	Número de píxeles	%	Número de píxeles	%
Bosque de Encino	87 626	12.28	114 529	16.05
Bosque de Pino	121 908	17.09	152 493	21.38
Bosque de Oyamel	19 395	2.72	28 516	4.00
Bosque Tropical Caducifolio	102 625	14.39	103 045	14.44
Bosque Mixto	112 685	15.80	79 987	11.21
Invernadero	182	0.03	-	-
Infraestructura	89 007	12.48	14 231	1.99
Agricultura y Pastizal	161 825	22.68	190 968	26.77
Afloramientos Rocosos	14 985	2.10	12 496	1.75
Matorral Crassiosulifolio	3 125	0.44	3 072	0.43
Bosque de Encino-Bosque Tropical Caducifolio	-	-	14 026	1.97
Total	713 363	100.00	713 363	100.00

relacionándolo con el aumento de la categoría agropecuario y la distribución de los píxeles restados en varias de las categorías, entre ellas la de bosque de encino-bosque tropical caducifolio. En las categorías afloramientos rocosos y matorral, la disminución en su cantidad de píxeles se relaciona con la adición del bosque de encino-bosque tropical caducifolio y agropecuario.

La confiabilidad del mapa final de vegetación y usos del suelo del Corredor Biológico Chichinautzin fue establecida mediante el cálculo de una nueva matriz de confusión. En ella se comparan los 203 puntos de referencia restantes, obtenidos mediante fotointerpretación y la interpretación visual (Tabla 8).

La matriz de confusión indica que la precisión de cada clase aumentó en relación con los resultados de matriz puntos de campo y fotointerpretación-clasificación supervisada, en poco más del 10 % en promedio, excepto para la categoría de afloramientos rocosos, que bajó de 86 a 69 %, mismo que puede ser explicado por una mala posición de los puntos de referencia al momento de calcular sus coordenadas. El bosque de encino-bosque tropical caducifolio presentó una precisión

baja en relación con lo propuesto por Anderson *et al.* (1976), sin embargo, su bajo porcentaje de precisión está dado por la confusión que existió con categorías que integran a esta misma: bosque de encino y bosque tropical caducifolio; ello proporciona un grado de confiabilidad cualitativo un poco más alto, ya que, después de todo, la confusión se encuentra entre elementos con las mismas características.

El bosque mixto presenta la misma dificultad que se observó desde el inicio del trabajo, ya que pese a haber aumentado su precisión en 5 % en relación con los resultados de la segunda matriz, sigue mostrando dificultad para discriminarse de los encinares y pinares.

La coincidencia del 100 % de los puntos de referencia de la categoría agropecuario con la interpretación visual es justificable, considerando que visualmente es una unidad de fácil discriminación, tanto en las imágenes ETM+ como en las fotografías aéreas, sobre todo si son digitales, y del mismo modo, se facilita la georreferencia de puntos muestra, dado que existen más puntos de referencia para su ubicación, tales como las parcelas o caminos diversos.

Tabla 8. Matriz de confusión: puntos obtenidos por fotointerpretación-interpretación visual

Categorías		Resultados de la interpretación visual										
		Bosque de Encino	Bosque de Pino	Bosque de Oyamel	Bosque Tropical Caducifolio	Bosque Mixto	Matorral Crasirosulifolio	Infraestructura	Agricultura y Pastizal	Afloramientos Rocosos	Bosque de Encino-Bosque Tropical Caducifolio	Precisión
Puntos de referencia	Bosque de Encino	171	0	0	0	0	0	0	0	0	9	95
	Bosque de Pino	18	300	5	9	0	0	0	0	0	0	90
	Bosque de Oyamel	0	10	107	0	0	0	0	0	0	0	91
	Bosque Tropical Caducifolio	0	0	0	90	0	0	0	18	0	0	83
	Bosque Mixto	22	13	0	0	127	0	0	0	0	0	78
	Matorral Crasirosulifolio	0	0	0	9	0	27	0	0	0	0	75
	Infraestructura	0	0	0	4	0	0	182	30	3	0	84
	Agricultura y Pastizal	0	0	0	0	0	0	0	270	0	0	100
	Afloramientos Rocosos	0	0	0	3	0	0	0	6	31	5	69
	Bosque de Encino-Bosque Tropical Caducifolio	9	0	0	7	0	0	0	2	0	36	67
	Fiabilidad	78	93	96	78	100	100	100	83	91	72	
Exactitud global = 90.15 %												

El alto porcentaje de fiabilidad, donde seis de diez categorías superan el 90 %, permite deducir que la interpretación visual alejó el error de clasificar píxeles en una categoría a la que no pertenecían. Tal es el caso de las unidades de bosque mixto, matorral e infraestructura que, teniendo una fiabilidad del 100 %, indican que los criterios utilizados para separarlos visualmente de otras unidades fueron correctos.

Como resultado final de este nuevo análisis, se obtuvo una precisión global del 90 % utilizando técnicas de interpretación visual; dicha precisión indica que la distribución espacial, presentada en la cartografía de Vegetación y Usos del Suelo del Corredor Biológico Chichinautzin, es confiable considerando el parámetro de 90 % que propone Anderson.

CONCLUSIONES

El mapa obtenido, vegetación y usos del suelo del Corredor Biológico Chichinautzin, aplicando técnicas digitales y visuales de interpretación de imágenes Landsat ETM+, con apoyo de fotografías aéreas, especialmente, digitales, es cuantitativamente confiable en un 90 % de precisión al presentar la localización y distribución de las coberturas mencionadas.

Conviene resaltar que los trabajos de campo, la adquisición de puntos muestra obtenidos mediante fotointerpretación y la información bibliográfica permitieron ampliar el marco de referencia espacial de localización y distribución de los elementos tratados.

La precisión y confiabilidad del método utilizado se basa en la interpretación visual, posterior

a la clasificación digital de imágenes de satélite Landsat ETM+, con apoyo en fotografías aéreas de alta resolución, lo que reduce el margen de error del producto final.

Así, cuando la zona en estudio es un Área Natural Protegida que posee una cobertura vegetal muy fragmentada, de lo que se deduce que es un espacio altamente alterado en sus recursos naturales, resulta muy difícil aplicar, únicamente, una clasificación digital y obtener un producto cartográfico confiable, por lo que la combinación de esta última técnica con una interpretación visual apoyada con fotografías aéreas y trabajo de campo, fue de gran ayuda para lograr un producto de mayor calidad.

Cabe destacar que las características de las fotografías aéreas digitales, utilizadas tanto para localizar áreas muestra como para adquirir un marco de referencia espacial más sólido, fueron de gran apoyo al realizar un trabajo de la naturaleza como el que aquí se presenta, pues permitió observar detalles que difícilmente se pueden identificar en las imágenes de satélite, ya sea mediante procesos digitales o visuales, e incluso en campo.

REFERENCIAS

- Anderson, J. R., E. E. Hardy, J. T. Roach and R. E. Wither (1976), "A land use and land cover classification system for use with remote sensor data", *U.S. Geological Survey, Professional Paper*, Government Printing Office, Washington, D.C., p. 964.
- Chuvieco, E. (2000), *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Ed. Rialp Madrid, p. 568.
- Diario Oficial de la Federación* (27 de noviembre de 1936), Decreto que crea el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, 30-09-1936.
- Diario Oficial de la Federación* (22 de enero 1937), Decreto que declara Parque Nacional El Tepozteco, los terrenos que rodean al pueblo de Tepoztlán, Morelos, 22-01-1937.
- Diario Oficial de la Federación* (segunda publicación 5 de diciembre de 1988), Decreto por el que se declara el área de protección de la flora y fauna silvestres, ubicada en los municipios de Huitzilac, Cuernavaca, Tepoztlán, Jiutepec, Tlalnepantla, Yautepec, Tlayacapan y Totolapan, Morelos.
- Diario Oficial de la Federación* (19 de mayo 1947), Lagunas de Zempoala Modificación de linderos, 19-05-1947.
- Fries, C. (1960), "Geología del estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central-meridional de México", *Boletín del Instituto de Geología*, núm. 60, México, p. 236.
- INE (2000), *Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas*, Instituto Nacional de Ecología, México, <<http://www.ine.gob.mx>: noviembre de 2000>.
- LGEEPA (1988), *Diario Oficial de la Federación* de fecha 28 de enero de 1988, con modificaciones publicadas en el *Diario Oficial de la Federación* de fecha 7 de enero del 2000, Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, México.
- Lugo H., J., M. A. Ortiz Pérez, J. L. Palacio Prieto y G. Bocco Verdinelli (1985), "Las zonas más activas en el Cinturón Volcánico Mexicano (entre Michoacán y Tlaxcala)", *Geofísica Internacional*, 24(1), pp. 83-96.
- Martín del Pozzo, A. L. (1990), *Geoquímica y paleomagnetismo de la Sierra Chichinautzin*, tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Martínez R., A. A. (2003), *Levantamiento de suelos a nivel general de Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Rzedowski, J. (1983), *Vegetación de México*, Limusa, México, p. 432.
- UAM-UAEM (1990), *Programa Integral de Manejo para el Área de Protección de Flora y Fauna Silvestre y Acuática "Corredor Biológico Chichinautzin"*, Estado de Morelos, México, p. 206.
- Sausen, T. M., J. Borges E. y E. Miglioranza (1997), Módulo I: Sistemas Sensores Ópticos, LANDSAT, Programa EDUCA SeRe-Elaboración de material didáctico para la enseñanza de la percepción remota, SELPER-Capítulo Brasil, INPE I.