

Cartographie et inventaire forestier au Mexique

Jean-François MAS*
Alejandro VELÁZQUEZ*
José-Luis PALACIO-PRIETO*
Gerardo Bocco**

* Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma
de México (Unam)
Circuito exterior, Cd Universitaria
AP 20-850 CP
01000 Mexico DF
Mexique

** Instituto de Ecología
Universidad Nacional Autónoma
de México (Unam)
AP 27, sucursal 3, Xangari
58089 Morelia Mich
Mexique

Une politique efficace de gestion et de conservation des ressources naturelles nécessite une information cartographique fiable et actualisée. Au Mexique, des méthodes d'analyse des images satellitaires haute résolution ainsi que des cartographies existantes ont permis d'établir un inventaire forestier et une base de données répondant aux objectifs de gestion de l'environnement et d'aménagement du territoire.



Mosaïque de fragments forestiers et de pâturages, région de Palenque, Chiapas.
A mosaic of forest fragments and pasture, Palenque region, Chiapas.
Photo H. Puig.

Jean-François MAS
Alejandro VELÁZQUEZ
José-Luis PALACIO-PRIETO
Gerardo BOCCO

RÉSUMÉ

CARTOGRAPHIE ET INVENTAIRE FORESTIER AU MEXIQUE

L'Institut de géographie de l'université nationale autonome du Mexique (Unam) a mené, entre les mois de mars et d'octobre 2000, la première phase de l'inventaire forestier du Mexique. L'objectif principal de ce travail, qui répond à une demande du ministère de l'environnement du Mexique (Semarnap), était d'élaborer une cartographie des ressources forestières qui puisse servir pour la gestion de l'environnement. Dans cet article, sont présentés les méthodes utilisées ainsi que les résultats et les produits obtenus.

Mots-clés : inventaire forestier, télé-détection, système d'information géographique, cartographie.

ABSTRACT

FOREST MAPPING AND INVENTORIES IN MEXICO

Between March and October 2000, the Institute of Geography of the National University of Mexico (UNAM) carried out the first stage in the Mexican national forest inventory under contract with the Mexican Ministry of the Environment (SEMARNAP). The main objective of the work was to produce a forest resources map for environment planning purposes. This paper describes the methods used and the results of the study.

Keywords: forest inventory, remote sensing, geographic information system, mapping.

RESUMEN

CARTOGRAFÍA E INVENTARIO FORESTAL EN MÉXICO

El Instituto de Geografía de la Universidad Autónoma Nacional de México (UNAM) llevó a cabo, entre marzo y octubre de 2000, la primera fase del inventario forestal nacional de México. El objetivo principal de este trabajo, que responde a una solicitud de la Secretaría del Medio Ambiente (SEMARNAP), era de elaborar la cartografía de los recursos forestales que pueda servir para la gestión ambiental. En este artículo, se presentan los métodos utilizados así como los resultados y los productos obtenidos.

Palabras clave: inventario forestal, percepción remota, sistema de información geográfica, cartografía.

Parcelle déboisée par brûlis, région de Términos, Campeche.
Slash-and-burn deforestation in the Términos region, Campeche.
Photo J.-F. Mas.



Introduction

Le Mexique est un pays qui présente une grande biodiversité et d'importantes étendues forestières (30 % de sa superficie) (TOLEDO, 1988 ; PUIG, 2000 ; RAMAMOORTHY *et al.*, 1998). Cependant, la végétation connaît des changements rapides dont l'ampleur n'est pas bien connue. Par exemple, les estimations du taux de déforestation varient de 370 000 ha par an à plus d'un million selon les sources d'information (SARH, 1994 ; FAO, 1997). Afin de mener à bien une politique de gestion et de conservation des ressources naturelles, il est nécessaire de disposer d'une information cartographique fiable et actualisée. C'est pourquoi le ministère mexicain de l'Environnement (Semarnap) a chargé l'Institut de géographie de l'Université nationale autonome du Mexique (Unam) d'élaborer une cartographie des ressources forestières qui puisse servir pour la gestion de l'environnement. Cette tâche, qui constitue la première étape de l'inventaire forestier du Mexique, a été menée à son terme, dans un temps très court (entre mars et octobre 2000), à partir de l'analyse d'images satellitaires haute résolution et des cartographies existantes. Dans cet article, les méthodes utilisées et les principaux résultats et produits obtenus sont présentés.

Méthode

La première étape a consisté à définir une nomenclature qui soit compatible avec les efforts de classification et de cartographie de la végétation antérieurs à ce travail (MIRANDA, HERNÁNDEZ, 1963 ; RZEDOWSKI, 1978 ; INEGI, 1980), qui réponde aux besoins liés à différentes problématiques (gestion forestière mais aussi aménagement du territoire, biodiversité, érosion, risques naturels), enfin qui propose des classes discernables sur des images satellitaires haute résolution. De plus, on a recherché une classification hiérarchique qui permette de générer une légende en accord avec l'échelle de représentation. Afin d'élaborer la nomenclature, plusieurs ateliers, auxquels ont participé les principaux spécialistes de la cartographie de la végétation au Mexique, ont été organisés.

Parallèlement à la définition de la nomenclature, la méthodologie d'analyse des images satellitaires a été mise au point. On a misé sur l'interprétation visuelle des images, et non sur des procédés numériques, car celle-ci donne de meilleurs résultats, surtout dans un pays aussi divers et complexe que le Mexique (SADER *et al.*, 1990 ; PALACIO, LUNA, 1995 ; MAS, RAMÍREZ, 1996), et permet, par ailleurs, de tirer profit de l'information existante, en particulier des données de l'Institut national de

statistiques, géographie et informatique (Inegi) et des connaissances de l'interprète.

La préparation des images a suivi les étapes suivantes :

- sélection d'images Landsat Etm+ de l'année 2000 sans nuage, prises durant la saison sèche ;
- correction géométrique, par transformation polynomiale, des images à l'aide de points d'appui localisés sur les cartes topographiques de l'Inegi, au 1/50 000 ;
- amélioration visuelle des images et création de compositions colorées.

L'autre source d'information utilisée dans la présente étude est constituée par la cartographie de végétation et d'occupation du sol de l'Inegi au 1/250 000. Ces cartes ont été numérisées et actualisées à l'année 1993 par l'Inegi. Elles présentent plus de 600 catégories (classes de végétation et d'occupation du sol) et ont été adaptées à la légende de l'inventaire forestier définie durant les ateliers.

Pour mener à bien l'interprétation visuelle, les compositions colorées et les cartes de l'Inegi ont été imprimées à l'échelle 1/125 000, respectivement sur papier et acétate. Un groupe de photo-interprètes expérimentés a actualisé et modifié les cartes de l'Inegi à partir des images satellitaires de l'année 2000. Ce processus a été conduit avec l'aide d'as-



Parcelle de maïs et fragments forestiers à différents stades de succession, région de Palenque, Chiapas.
Maize plot and fragments of forest in various stages of succession, Palenque region, Chiapas.
Photo H. Puig.

**Figure 1.**

Couverture photographique réalisée lors de l'inventaire forestier du Mexique. L'espacement des lignes de vol est de 50 ou 80 km selon l'hétérogénéité de la région survolée.

Cover photo taken during the Mexican Forest Inventory. Flight paths are 50 to 80 km apart, depending on the complexity of each region.

sesseurs, spécialistes en végétation, et supervisé par l'Inegi. Les cartes modifiées ont ensuite été intégrées dans la base de données d'un système d'information géographique (Sig) pour générer une base de données pour tout le pays. Avant d'élaborer la cartographie et de calculer les statistiques de superficie, plusieurs tests informatiques ont été mis en œuvre afin de détecter les incohérences ou erreurs qui auraient pu s'introduire. La préparation des images, leur interprétation, la supervision, l'intégration dans la base de données et l'élaboration des produits cartographiques ont été réalisées simultanément par différents groupes de travail dans le but d'accélérer l'ensemble du processus.

Afin d'évaluer la fiabilité de la cartographie, 60 000 photographies numériques aériennes ont été prises suivant un maillage de lignes de vol qui traversent tout le pays et couvrent environ 10 % du territoire

**Figure 2.**

Composition colorée d'une image Landsat ETM+ et photographie aérienne digitale d'une partie de la région de la lagune de Términos, au Campeche.

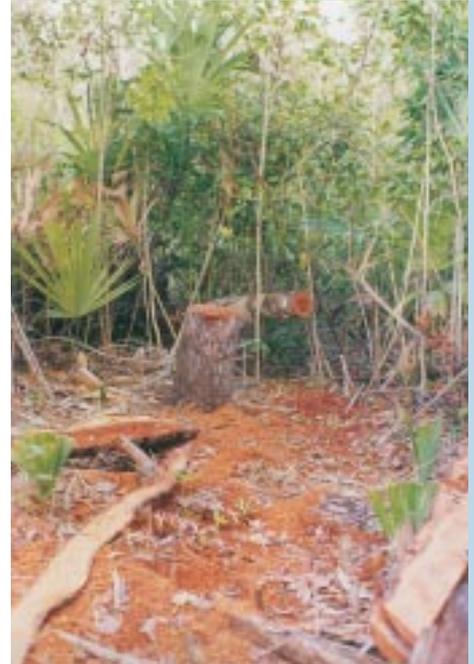
Colour composite of a Landsat ETM+ image and an aerial digital photograph of part of the Términos lagoon region in Campeche.

(figure 1). Un échantillonnage aléatoire stratifié a permis de sélectionner un échantillon de photographies qui correspondent à chacune des catégories de la nomenclature (PERALTA *et al.*, 2001 a et b). L'interprétation de ces photographies, imprimées au 1/8 000 et beaucoup plus détaillées que les images satellitaires (figure 2), permet de définir le type de couverture de sites de vérification et d'évaluer la qualité des cartes à l'aide de matrices de confusion (MAS *et al.*, 2001).

Résultats

Les ateliers de conformation de la nomenclature ont permis de définir une classification hiérarchique, organisée en quatre niveaux, et comprenant 75 classes au niveau le plus détaillé. Le niveau le plus général indique le type de végétation, comme forêt tempérée, forêt tropicale ou agri-

culture. Chaque type de végétation se divise en formations. Par exemple, le type de végétation forêt tropicale présente deux formations : forêt tropicale sempervirente et subsempervirente (*selva perennifolia y subperennifolia*) ; forêt tropicale caducifoliée et semi-caducifoliée (*selva caducifolia y subcaducifolia*). Ces formations se divisent à leur tour en différents groupements. Par exemple, la formation forêt tropicale sempervirente se divise en forêt tropicale haute et moyenne sempervirente (*selva alta y mediana perennifolia*), forêt tropicale basse sempervirente (*selva baja perennifolia*), forêt tropicale haute et moyenne subsempervirente (*selva alta y mediana subperennifolia*) et forêt tropicale basse subsempervirente (*selva baja subperennifolia*). Enfin, le niveau le plus détaillé (association) donne une information sur le degré de conservation de la végétation et n'est pas applicable à tous les groupements (tableau I).



Coupe illégale, région de Los Petenes, Campeche.

Illegal felling, Los Petenes region, Campeche.

Photo J.-F. Mas.

Tableau I.
Légende pour la formation forêt tropicale. La même structure de nomenclature a été élaborée pour les autres formations, donnant un total de 75 classes.

Formation (<i>tipo</i>)	Groupement (<i>comunidad</i>)	Association (<i>sub-comunidad</i>)
Forêt tropicale sempervirente (<i>selva perennifolia y subperennifolia</i>)	Forêt tropicale haute et moyenne sempervirente (<i>selva alta y mediana perennifolia</i>)	Végétation primaire ou secondaire arborée Végétation secondaire arbustive ou herbacée
	Forêt tropicale basse sempervirente (<i>selva baja perennifolia</i>)	Végétation primaire ou secondaire arborée Végétation secondaire arbustive ou herbacée
	Forêt tropicale haute et moyenne subsempervirente (<i>selva alta y mediana subperennifolia</i>)	Végétation primaire ou secondaire arborée Végétation secondaire arbustive ou herbacée
	Forêt tropicale basse subsempervirente (<i>selva baja subperennifolia</i>)	Végétation primaire ou secondaire arborée Végétation secondaire arbustive ou herbacée
Forêt tropicale caducifoliée et semi-caducifoliée (<i>selva caducifolia y subcaducifolia</i>)	Forêt tropicale moyenne caducifoliée et semi-caducifoliée (<i>selva mediana caducifolia y subcaducifolia</i>)	Végétation primaire ou secondaire arborée Végétation secondaire arbustive ou herbacée
	Forêt tropicale basse caducifoliée et semi-caducifoliée (<i>selva baja caducifolia y subcaducifolia</i>)	Végétation primaire ou secondaire arborée Végétation secondaire arbustive ou herbacée
	Fourré subtropical (<i>matorral subtropical</i>)	Végétation primaire Végétation secondaire arbustive ou herbacée
	Forêt tropicale basse épineuse (<i>selva baja espinosa</i>)	Végétation primaire ou secondaire arborée Végétation secondaire arbustive ou herbacée



Paysage en mosaïque (pâturages, cultures, fragments forestiers), région de Palenque, Chiapas.

A mosaic of pasture, crops and fragments of forest, Palenque region, Chiapas.

Photo H. Puig.

Ces 75 catégories sont le produit de l'agrégation de classes de la nomenclature de l'Inegi qui ne sont pas discernables sur les images satellitaires. Par exemple, les forêts mixtes de pins et de chênes sont représen-

tées par huit catégories dans la cartographie de l'Inegi, selon le genre dominant et la phase de succession de la végétation. Certaines de ces huit classes sont groupées entre elles afin de former deux catégories qui

présentent le meilleur contraste sur l'image (tableau II). La cartographie digitale de 1993 a été adaptée à la nouvelle nomenclature, par agrégation de polygones appartenant à la même catégorie, et imprimée sur acetate au 1/125 000.

Cent vingt-six images Landsat, la plupart sans nuage et prises entre les mois de janvier et avril 2000, ont été acquises. Leur correction géométrique présente une erreur de moins d'un pixel (30 m). Des compositions colorées ont été élaborées en combinant différentes bandes spectrales : 5, 4, 2 (moyen infrarouge, proche infrarouge et visible) et 7, 5, 4 (moyen infrarouge et proche infrarouge) selon la région. Elles ont également été imprimées au 1/125 000 afin d'être interprétées visuellement pour actualiser la base de données de l'Inegi.

À partir de la base de données de l'année 2000, 121 cartes et 121 spatio-cartes¹ au 1/250 000 ont été élaborées (figures 3 et 4). La superficie de chacun des groupements a été calculée à l'échelle nationale, pour chaque État et

Tableau II.

Élaboration de la nomenclature de l'inventaire forestier par regroupement de classes de l'Inegi. Ce regroupement permet de réduire la nomenclature de l'Inegi de 642 à 75 classes discernables sur les images satellitaires. Dans l'exemple ci-dessous, les huit classes de forêt mixte de pins et de chênes sont regroupées quatre à quatre pour finalement former deux classes.

Inegi	Inventaire forestier 2000
Forêt mixte de pins et de chênes (chêne dominant), végétation primaire	Forêt mixte de pins et de chênes, végétation primaire ou secondaire arborée
Forêt mixte de pins et de chênes (chêne dominant), végétation secondaire arborée	
Forêt mixte de pins et de chênes (chêne dominant), végétation secondaire arbustive	
Forêt mixte de pins et de chênes (chêne dominant), végétation secondaire herbacée	
Forêt mixte de pins et de chênes (pin dominant), végétation primaire	Forêt mixte de pins et de chênes, végétation secondaire arbustive ou herbacée
Forêt mixte de pins et de chênes (pin dominant), végétation secondaire arborée	
Forêt mixte de pins et de chênes (pin dominant), végétation secondaire arbustive	
Forêt mixte de pins et de chênes (pin dominant), végétation secondaire herbacée	

¹ Une spatio-carte est un produit image obtenu à partir d'une ou plusieurs scènes originales corrigées géométriquement et assemblées par mosaïquage numérique.

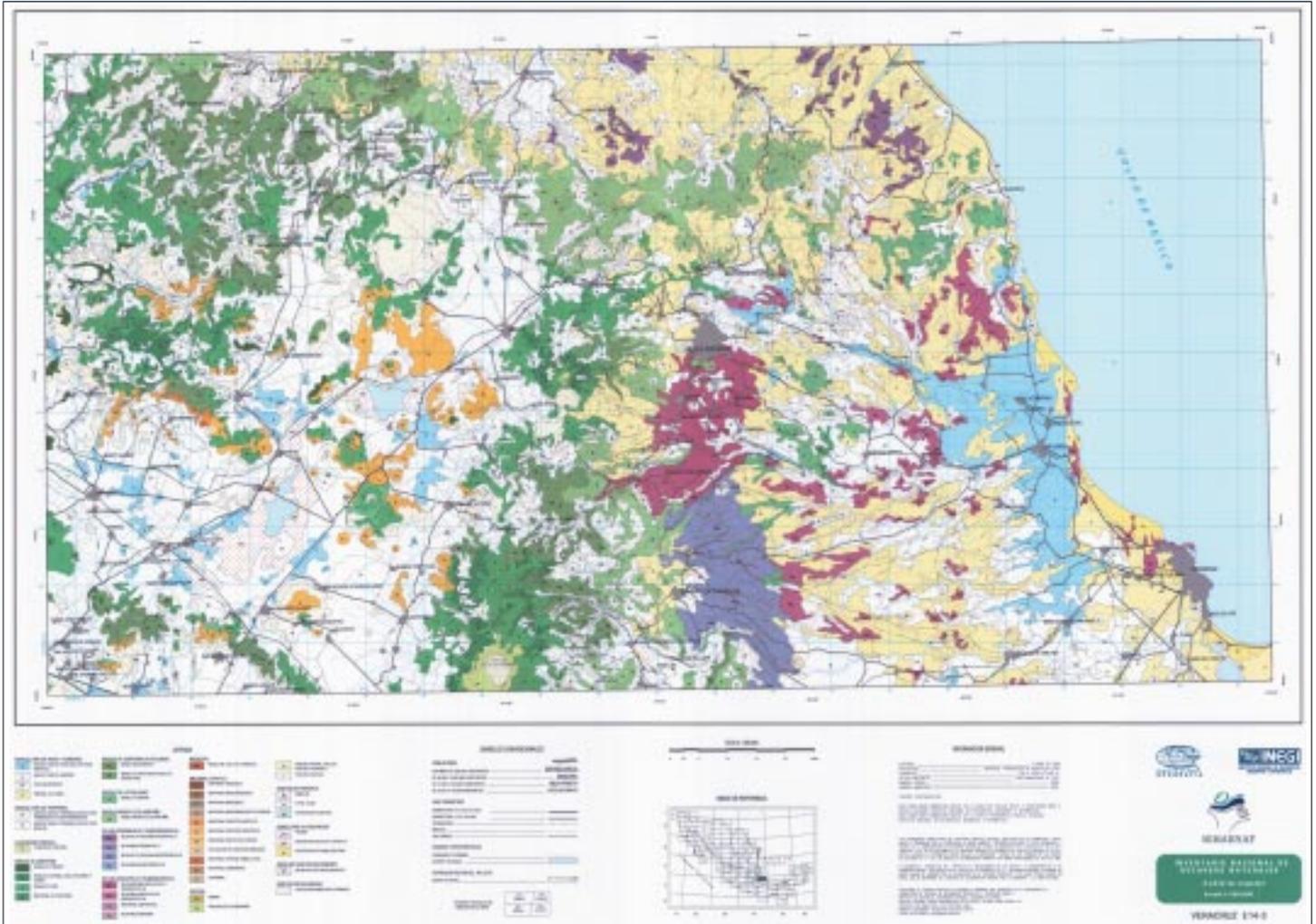


Figure 3.

Un exemple de carte de la couverture végétale. Le territoire mexicain est couvert par 121 cartes.
An example of vegetation map. The entire Mexican territory is covered by 121 maps.

par région hydrologique (figure 5). Un dictionnaire, qui définit chacune des classes de la légende, et des métadonnées², qui décrivent chaque produit, ont également été obtenus et proposés. Une partie de cette information est disponible par le biais d'Internet (<http://132.248.14.16/inventario.html>). La couverture forestière est estimée à 635 800 km². Quant à l'agriculture, cette étude montre qu'elle occupe une surface plus importante que celle couramment admise.

² Les métadonnées sont des données servant à décrire des ressources électroniques. Tout comme des notices catalographiques de bibliothèque, elles permettent un repérage de l'information en utilisant une structure régissant la description des documents dont elles sont dérivées. Elles permettent un repérage très fin des unités d'information par des moteurs de recherche.



Coupe illégale, région de Los Petenes, Campeche.
Illegal felling, Los Petenes region, Campeche.
 Photo J.-F. Mas.

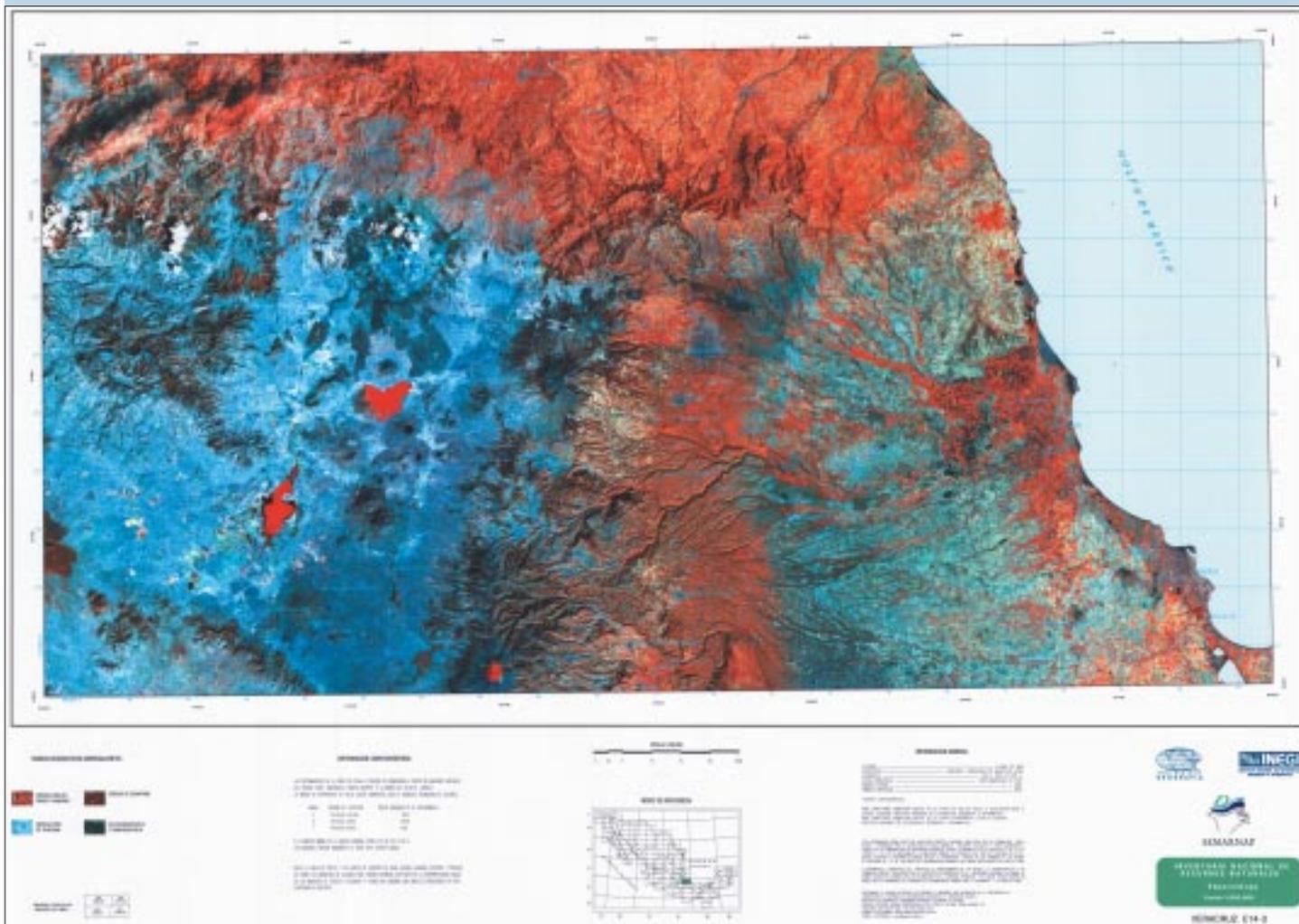


Figure 4.

Un exemple de spatiocarte. Les spatiocartes ont été réalisées à partir des compositions colorées utilisées lors de la photo-interprétation. Une toponymie simplifiée et une légende facilitent leur lecture.

An example of satellite map. The satellite maps were drawn up from the colour composites used for photo-interpretation, and include simplified toponymic information and legends.



Chargement illégal de bois saisi par les autorités. Campeche.

A load of illegally felled timber impounded by the authorities. Campeche.

Photo J.-F. Mas.

L'évaluation de la fiabilité de la base de données a été menée à bien uniquement dans le nord du pays et pour cinq catégories, à partir de l'analyse de 897 photographies. La fiabilité est supérieure à 70 % pour la plupart des catégories et les confusions se présentent entre catégories similaires comme forêt de pins et forêt mixte de pins et de chênes, par exemple. Ces valeurs de fiabilité sont semblables ou supérieures à celles obtenues par d'autres travaux similaires (FRANKLIN *et al.*, 2000 ; ZHU *et al.*, 2000). Cependant, il est important de réaliser cet exercice pour toutes les catégories et l'ensemble du pays.

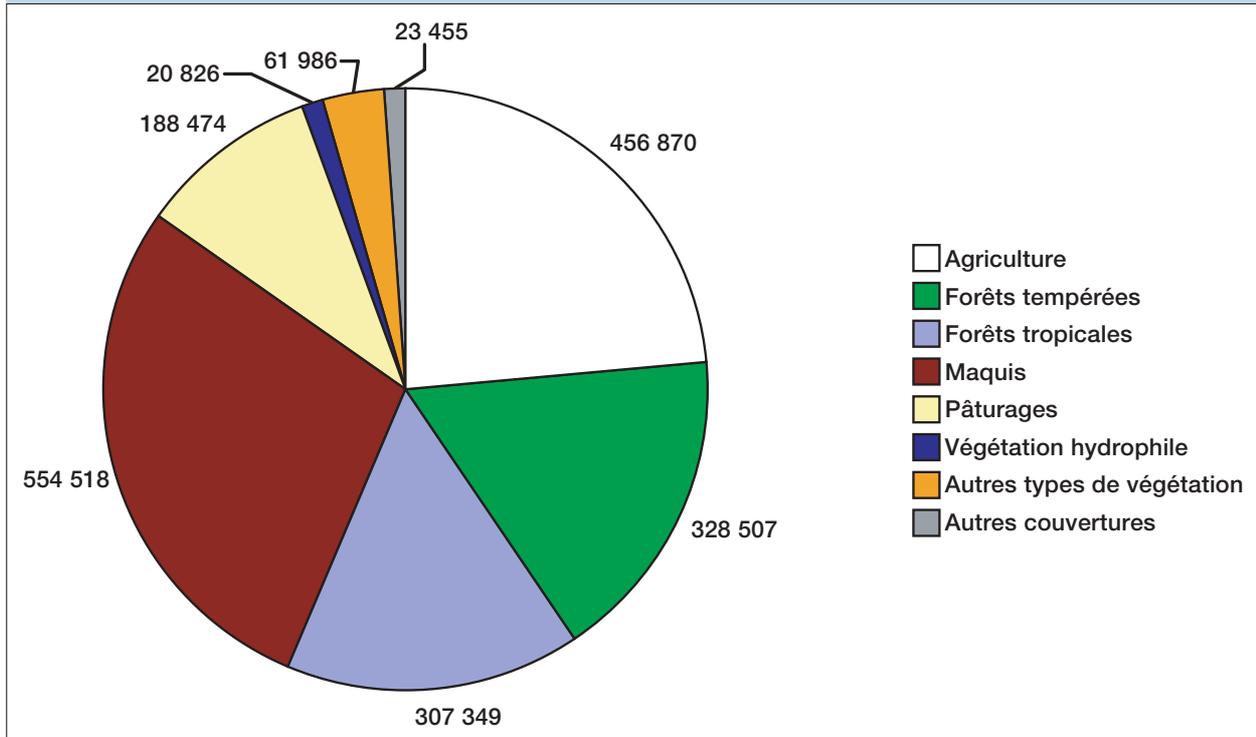


Figure 5.

Superficie occupée (km²) par les différents types considérés par l'inventaire forestier du Mexique.

Areas covered (km²) by the various forest types included in the Mexican Forest Inventory.

La grande quantité d'information générée dans le cadre de ce travail a de nombreuses applications, dont quelques-unes sont déjà opérationnelles comme la réalisation de diagnostics environnementaux, l'identification de régions de grande biodiversité et l'aménagement du territoire. Comme la nomenclature et l'échelle de cet inventaire sont compatibles avec

celles des cartes de l'Inegi élaborées durant les décennies passées, ces données sont utilisées pour mener à bien un suivi des changements de l'occupation des terres, en particulier de la déforestation. Par ailleurs, l'étape suivante de l'inventaire forestier prévoit la mise en œuvre de mesures détaillées sur le terrain afin d'estimer volumes et accroissements.



Fragment de forêt tropicale basse. Campeche.
Fragment of lowland tropical forest. Campeche.
Photo J.-F. Mas.



Forêt tropicale, région de Los Petenes, Campeche.
Tropical forest, Los Petenes region, Campeche.
Photo J.-F. Mas.

Références bibliographiques

FAO, 1997. State of the world forests 1997. Rome, Italie, Fao, 201 p.

FRANKLIN J., WOODCOCK C. E., WARBINGTON R., 2000. Multi-Attribute Vegetation Maps of Forest Service Lands in California Supporting Resource Management Decisions. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 66 (10) : 1209-1217.

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

MAS J. F., RAMÍREZ I., 1996. Comparison of land use classifications obtained by visual interpretation and digital processing. ITC Journal, (3-4) : 278-283.

MAS J. F., PALACIO J. L., VELÁZQUEZ A., BOCCO G., 2001, Evaluación de la confiabilidad temática de bases de datos cartográficas, Memoria Digital CD interactivo, I congreso nacional de Geomática, Guanajuato, 26-28 de septiembre de 2001. (http://indy2.igeograf.unam.mx/dote/evalconf_congreso.htm).

MIRANDA F., HERNÁNDEZ X., 1963. Los Tipos de vegetación de México y su clasificación. Boletín de la Sociedad Botánica de México, 28, 73 p.

PALACIO J., LUNA L., 1995. Clasificación espectral automática vs. Clasificación visual. Un ejemplo al sur de la Ciudad de México. Investigaciones Geográficas, 29 : 25-40.

PERALTA-HIGUERA A., PALACIO J. L., BOCCO G., MAS J. F., VELÁZQUEZ A., VICTORIA A., BERMÚDEZ R., MARTÍNEZ U., PRADO J., 2001 a. Nationwide Sampling of México with Airborne Digital Cameras : an Image Database to Validate the Interpretation of Satellite Data. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. In : 18th Biennial Workshop on Color Photography & Videography in Resource Assessment, Amherst, Massachusetts, États-Unis, 16-18 mai 2001. Article n° 20, 9 p.

PERALTA-HIGUERA A., PRADO-MOLINA J., PALACIO-PRIETO J. L., BOCCO G., MAS J. F., VELÁZQUEZ A., 2001 b. Aerial Sampling of México by Digital Photography. A Strategy for Validating the Interpretation of ETM+ Data. In : International Symposium on Spectral Sensing Research 2001, Québec, Canada, 10-15 juin 2001. Article n° 72, 9 p.

PUIG H., 2000. Diversité spécifique et déforestation : l'exemple des forêts tropicales humides du Mexique. Bois et Forêts des Tropiques, 268 (2) : 41-55.

RAMAMOORTHY T. P., BYE R., LOT A., FA J., 1998. Diversidad biológica de México, orígenes y distribución. Mexico, Mexique, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, 792 p.

RZEDOWSKI J., 1978. Vegetación de México. Mexico, Mexique, Editorial Limusa, 314 p.

SADER S., STONE T., JOYCE A., 1990. Remote sensing of tropical forests : an overview of research and applications using photographic sensors. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 55 (10) : 1343-1351.

SARH, 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico-México, Memoria Nacional. Mexico, Mexique, Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre, Dirección General Forestal, SARH, 81 p.

TOLEDO V. M., 1988. La diversidad biológica de México. Ciencia y Desarrollo, 14 (81) : 17-30.

ZHU Z., YANG L., STEHMAN S. V., CZAPLEWSKI R. L., 2000. Accuracy Assessment for the U.S. Geological Survey Regional Land-Cover Mapping Program : New York and New Jersey Region. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 66 (12) : 1425-1435.

Culture de maïs et forêt tropicale. Campeche.
Maize cropping and tropical forest. Campeche.
Photo J.-F. Mas.



Synopsis

FOREST MAPPING AND INVENTORIES IN MEXICO

Jean-François MAS
Alejandro VELÁZQUEZ
José-Luis PALACIO-PRIETO
Gerardo BOCCO

Because of the rapid changes

currently affecting Mexico's forest cover, reliable and updated cartographic information has become essential for decision making. This is why the Institute of Geography of the National University of Mexico (UNAM) has undertaken to map forest resources throughout Mexico as part of the national forest inventory programme.

Production of the cartographic database

The first step was to define a nomenclature that would be compatible with existing maps and would help address issues such as forest management, spatial planning or biodiversity by providing for classes that can be discerned on satellite images.

The maps were drawn up using data from two main sources: ETM+ Landsat images taken in 2000, Vegetation and land use maps from the National Institute of Statistics, Geography and Information Technology (INEGI), to a scale of 1/250 000 and updated to 1993.

It was decided to adopt an approach relying on visual interpretations of colour composite images. This produces better results than digital approaches, especially for a country as complex and diverse as Mexico. The colour composites and INEGI maps, which were previously adapted to the forest inventory nomenclature, were printed out to a scale of 1/125 000. An experienced photo interpreting team then updated and modified the INEGI maps on the basis of satellite images taken in 2000. The modified maps were then incorporated into the Geographic Information System (GIS) to generate a database for the entire country. Map quality was assessed against samples from a series of 60 000 digital photographs taken from the air.

A geographic database updated to 2000

The nomenclature was defined in workshops by the main specialists in Mexican vegetation. It is ranked into four levels comprising 75 detailed classes. Colour composites of 126 Landsat images were interpreted visually to update the database. Maps and satellite maps to a scale of 1/250 000 were then drawn up from the database as updated to 2000. Surface areas were calculated for each class of vegetation. Forest cover is estimated at 635 800 km², or 33 % of the territory. The study has shown that agriculture occupies larger areas than was previously thought.

Quality assessments of the database were completed only for the north of the country. Reliability is 70 % or higher for most categories, a result which is equivalent to or better than those produced by other similar studies.

Areas of application

The information generated by the forest inventory programme has applications in many areas including environmental diagnoses, the identification of areas with high biodiversity, spatial planning and monitoring of land use changes, especially deforestation. Detailed measurements on the ground were also made to assess volumes and growth.