

Mapping the condition of mangroves of the Mexican Pacific using C-band ENVISAT ASAR and Landsat optical data

Cartografía de la condición de los manglares del Pacífico mexicano usando datos de la banda C de ENVISAT ASAR y datos ópticos de Landsat

JM Kovacs^{1*}, C Zhang², FJ Flores-Verdugo³

¹Department of Geography, Nipissing University, North Bay, Ontario P1B 8L7, Canada. * E-mail: johnmk@nipissingu.ca

²Department of Geosciences, East Tennessee State University, Box 70357, Johnson City, TN 37614, USA.

³Instituto del Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, 82000 Mazatlán, Sinaloa, México

Abstract

To determine whether spaceborne C-band SAR data could be used alone, or in conjunction with optical data, for accurately mapping mangrove forests of the Mexican Pacific, four scenes of dual-polarized ENVISAT ASAR data, at two incidence angles, were collected for the Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas estuarine-mangrove complex. Several combinations of these ASAR data were classified to determine the most optimal arrangement for mangrove mapping. In addition, corresponding Landsat TM data were classified using the same training sites. The overall accuracy in mapping these mangroves did improve when more than one polarization mode was employed. In general, the higher incidence angle data (~41° vs ~23°) provided better results. In all circumstances, the optical data alone provided higher classification accuracies. When contained as one mangrove class, the highest overall accuracy achieved using the ASAR data was 54% as compared to 76% for the optical data. When considering four separate mangrove classes, representing the four conditions typical of this system (dead, poor condition, healthy, tall healthy), overall accuracies dropped to 45% and 63%, respectively. With the limited penetration of C-band into canopies, it was difficult to separate healthy and tall healthy mangrove from palm and other terrestrial forests using the ASAR data. In addition to confusion amongst the four mangrove classes, the dead mangrove stands created considerable misclassification as they were readily misidentified with water and saltpan areas in the optical data and with agricultural lands in the ASAR data procedure. Given the advantage of ASAR for identifying dead stands from open water and saltpan, these data were then used in conjunction with the optical data to reduce the misclassification of these areas.

Key words: classification, Landsat, mangroves, Mexico, remote sensing, SAR.

Resumen

Para determinar si los datos de la banda C del sensor espacial SAR pudieran utilizarse solos, o de manera simultánea con datos ópticos, para hacer mapas precisos de bosques de manglar del Pacífico mexicano, se tomaron cuatro escenas de ENVISAT ASAR de doble polarización, con dos ángulos de inclinación, del complejo estuarino de manglar Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas. Se clasificaron varias combinaciones de datos de ASAR con el propósito de determinar el arreglo óptimo para crear mapas de manglares. Además, se clasificaron datos de Landsat TM para los mismos sitios de ensayo. La precisión global al hacer mapas de estos manglares aumentó cuando se utilizó más de un modo de polarización. En general, los resultados fueron mejores cuando el ángulo de incidencia fue mayor (~41° vs ~23°). En todos los casos, los datos ópticos por sí solos proporcionaron una clasificación más precisa. Con una sola clase de manglar la mayor precisión global utilizando los datos de ASAR fue de 54%, comparada con 76% con los datos ópticos. Cuando se consideraron las cuatro diferentes clases de manglar que representan las condiciones típicas de este sistema (manglar muerto, pobre, sano y sano alto), la precisión global se redujo hasta 45% y 63%, respectivamente. Debido a la limitada penetración de la banda C en el follaje, utilizando datos del ASAR fue difícil diferenciar los manglares sanos y sanos altos de las palmas y otros bosques terrestres. Además de la confusión entre las cuatro clases de manglar, las zonas de manglares muertos resultaron erróneamente clasificadas como áreas salinas y de aguas libres de vegetación, con los datos ópticos, y como tierras agrícolas con los datos de ASAR. Dadas las ventajas para diferenciar áreas de manglar muerto de los espejos de agua y las salinas con los datos de ASAR, éstos se utilizaron de manera simultánea con datos ópticos para reducir los errores en la clasificación de estas áreas.

Palabras clave: clasificación, Landsat, manglares, México, percepción remota, SAR.

Introduction

Within the last few decades there has been a myriad of studies involving the use of spaceborne sensors to map

Introducción

En las últimas décadas se han realizado numerosos estudios utilizando sensores espaciales para cartografiar los bosques de

mangrove forests. Since many of these coastal wetlands are located in remote areas and are often extensive and for the most part very difficult to traverse, the use of their data can provide resource managers with a relatively quick, effective, and economically feasible method for mangrove mapping. Moreover, many of these forests are experiencing rapid changes, primarily from anthropogenic sources (Valiela *et al.* 2001, Walters *et al.* 2008), and thus these data, which provide a continuous and reliable source of records, could form the basis of long-term mangrove monitoring programs.

To date most applications in mangrove mapping from spaceborne sensors have relied upon conventional optical sensors, namely those of the SPOT and Landsat series. While the recent very high resolution optical sensors (e.g., IKONOS) are proving to be extremely effective in mangrove mapping (Wang *et al.* 2004a, b; Kovacs *et al.* 2005), the traditional sensors remain popular given their affordability, extensive coverage, and ease of use. In particular, they remain the favored choice for short- and long-term mangrove forest change detection endeavors (e.g., Muttitanon and Tripathi 2005, Beland *et al.* 2006, Thu and Populus 2007).

Since many mangrove forests are located in tropical regions where cloud cover is either persistent year round or for lengthy periods of time (e.g., monsoon season), the use of optical sensors for mangrove mapping and monitoring may not always be plausible. As it is less hindered by such atmospheric events and independent of sunlight conditions, Synthetic Aperture Radar (SAR) could be used as the alternative, or supplement, remote sensing venue for these regions. In fact, several remote sensing studies involving SAR, mainly from airborne platforms (Mougin *et al.* 1999; Proisy *et al.* 2000, 2002) but also spaceborne (Kovacs *et al.* 2006, Simard *et al.* 2006), have shown that even backscatter can be correlated, to some degree, with mangrove biophysical parameters (e.g., height, biomass).

With regards to mangrove mapping using spaceborne SAR, only a few studies have been published. Although limited in number, the results of these investigations would suggest that spaceborne SAR could be used as an alternative to or a complementary source with optical spaceborne data. For example, Simard *et al.* (2002) recently employed both JERS-1 and ERS-1 data to map coastal vegetation of Gabon. The two mangrove classes they examined consisted of high mangrove, mainly tall *Rhizophora racemosa*, and short mangrove, dominated by *Avicennia germinans* of less than 5 m in height. Their results suggest that to best distinguish these mangroves from other land cover/use types such as open and closed forests, urban, grass, and woody savannas, it is best to use these data in combination. Their overall classification accuracies increased from 61% and 66% for the ERS-1 and JERS-1 data alone, respectively, to 84% when used together. In their study of mangrove forests of Phangnga Bay, Thailand, Aschbacher *et al.* (1995) reported that neither ERS-1 nor JERS-1 data could sufficiently be used to separate mangrove classes from non-mangrove classes; however, they did report that by combining ERS-1 data with SPOT XS data they increased the number of

manglar. Dado que muchos de estos humedales costeros se localizan en zonas remotas y con frecuencia muy extensas y difíciles de atravesar, el uso de ese tipo de datos puede proporcionar a los manejadores de recursos un método relativamente rápido, eficiente y económico para trazar mapas de los manglares. Además, muchos manglares están experimentando intensos cambios principalmente de origen antropogénico (Valiela *et al.* 2001, Walters *et al.* 2008) y, por tanto, estos datos, cuya fuente es continua y confiable, pueden constituir la base de programas para su monitoreo a largo plazo.

Hasta la fecha la mayoría de las aplicaciones de sensores espaciales a la cartografía de manglares ha dependido de sensores ópticos convencionales, especialmente de los de las series SPOT y Landsat. Aunque los recientes sensores ópticos de muy alta resolución (e.g., IKONOS) han mostrado ser muy eficientes para elaborar mapas de manglares (Wang *et al.* 2004a, b; Kovacs *et al.* 2005), los sensores tradicionales siguen siendo populares dado su bajo costo, amplia cobertura y facilidad de uso, y siguen siendo los preferidos para trabajos de detección de cambios en manglares a corto y largo plazo (e.g., Muttitanon y Tripathi 2005, Beland *et al.* 2006, Thu y Populus 2007).

En vista de que muchos bosques de manglar se encuentran en regiones tropicales donde la cobertura de nubes persiste a lo largo del año o por largos periodos de tiempo (e.g., época del monzón), no es siempre factible el uso de sensores ópticos para su cartografía y monitoreo. Las percepciones del radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés) sufren menos obstrucción por las nubes y, además, no dependen de las condiciones de luz por lo que pueden resultar una forma alternativa, o complementaria, al uso de sensores remotos en tales regiones. De hecho, varios estudios con sensores remotos que incluyen al SAR, principalmente desde plataformas aéreas (Mougin *et al.* 1999; Proisy *et al.* 2000, 2002) pero también espaciales (Kovacs *et al.* 2006, Simard *et al.* 2006), han mostrado que aún la retrodispersión puede ser correlacionada, hasta cierto grado, con los parámetros biofísicos (e.g., altura, biomasa) de los manglares.

Se han publicado pocos estudios cartográficos de manglares usando el SAR desde alguna plataforma espacial, pero sus resultados indican que éste podría utilizarse como una fuente alterna o complementaria a los datos de sensores ópticos espaciales. Por ejemplo, Simard *et al.* (2002) recientemente emplearon datos tanto del JERS-1 como del ERS-1 para elaborar mapas de la vegetación costera de Gabón. Estos autores examinaron manglares clasificándolos en manglar alto, principalmente de *Rhizophora racemosa*, y manglar bajo, dominado por *Avicennia germinans* de menos de 5 m de altura. Sus resultados sugieren que la mejor forma de distinguir estos manglares de otros tipos de cobertura o uso del suelo, tales como bosques abiertos y cerrados, zonas urbanas, pastizales y sabanas arboladas, es combinando datos. La precisión global de la clasificación se incrementó de 61% y 66% cuando se usaron los datos individuales por separado del ERS-1 y el JERS-1, respectivamente, hasta 84% cuando se utilizaron en conjunto.

successfully identified mangrove classes from six to ten. Specifically, the ERS-1 data allowed them to further subdivide their pure and mature *Rhizophora* class into tall, medium, and low height classes. Dwivedi *et al.* (1999) also reported that in combination with optical IRS-1B data, ERS-1 data could be used to sufficiently separate mangroves from other vegetation, estuaries, creeks, and associated water bodies within the Sundarban delta of West Bengal, India.

Since the aforementioned studies have been limited to older SAR platforms, the purpose of this research was to examine the potential use of the newer generation of SAR platforms, in this particular case ENVISAT ASAR. Consequently, select polarization modes and two incidence angles were assessed in order to determine what data, or combination of data, could be used to accurately map these wetlands. In addition, it was anticipated that these data may also be used in conjunction with optical data to improve mangrove classification. According to Valiela *et al.* (2001), the annual rate of mangrove forest loss not only exceeds that of terrestrial rainforest but it is also greatest in the Americas. Moreover, they reported an estimated loss of total mangrove area in Mexico of 20% over a nine-year period. Consequently, the focus of this investigation was an extensive mangrove forest which is typical of the Pacific coast of the Americas. As this system has experienced considerable degradation it could provide a more realistic example of the type of forests that need to be urgently mapped not only in Mexico but in other regions of the Americas.

Material and methods

Study area

The Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas estuarine-mangrove complex (fig. 1) is considered one of the largest of its type on the Pacific coast of the Americas, with an estimated 80,000 ha of mangroves and 150,000 ha of seasonal flood plains (*marismas*). The system contains numerous lagoons, including the very large Agua Brava Lagoon, and has two inlets, a natural inlet in Teacapán and an artificial inlet, opened in 1971, known as the Cuautla Canal (>15 m deep and >1000 m wide). An important natural feature of this area is the 150 semi-parallel sand barriers with mangroves that are the result of Holocene transgression and the river sediment inputs (Curry *et al.* 1969). In addition to seasonal flow inputs from the Cañas, Rosamorado and Bejuco rivers, the system receives the discharge from two permanent rivers, the Acaponeta and the San Pedro.

The black mangrove (*Avicennia germinans*) and the white mangrove (*Laguncularia racemosa*) dominate in the north and south section of the system, respectively. Large red mangrove (*Rhizophora mangle*) can be found along the edges of the lagoons and estuaries and, in the south section, can form relatively large homogeneous islands. Although the mangroves of this system are extremely productive (Flores-Verdugo *et al.* 1990) and considered a valued renewable resource by the local inhabitants (Kovacs 1999), they have undergone extensive

En un estudio sobre los manglares de la Bahía de Phangnga, Tailandia, Aschbacher *et al.* (1995) encontraron que ni los datos del ERS-1 ni los del JERS-1 servían para diferenciar clases de manglar de otras clases de cobertura, pero al combinar los datos del ERS-1 con los del SPOT XS el número de clases de mangle identificadas correctamente aumentó de seis a diez. Específicamente, los datos del ERS-1 permitieron una mayor subdivisión de una sola clase de *Rhizophora mangle* en tres clases dependiendo de su altura: alto, mediano y bajo. Dwivedi *et al.* (1999) también encontraron que al emplear los datos ópticos del IRS-1B en conjunto con los del ERS-1 fue posible diferenciar bastante bien los manglares de la demás vegetación, y de estuarios, arroyos y cuerpos de agua asociados en el delta de Sundarban en Bengala Occidental, India.

Dado que los trabajos antes mencionados se han limitado a las plataformas más antiguas de SAR, el objetivo de este estudio fue evaluar el uso potencial desde sus nuevas plataformas, en este caso ENVISAT ASAR. Para ello se evaluaron varios modos de polarización y dos ángulos de incidencia para determinar cuáles datos, o combinación de datos, pueden ser utilizados para trazar mapas más precisos de los manglares; además, se consideró la posibilidad de utilizarlos en conjunto con datos ópticos para mejorar la clasificación de este tipo de humedales. Según Valiela *et al.* (2001), la tasa anual de pérdida de bosques de manglar no sólo supera la de bosques tropicales sino que, además, es mayor en el continente americano. Estos autores estimaron una pérdida total del área de manglares en México de 20% durante un periodo de nueve años. En particular este estudio se enfocó en un extenso bosque de manglar típico de la costa del Pacífico del continente americano, el cual ha sufrido una considerable degradación y, en consecuencia, puede ser un ejemplo más real de los tipos de bosques que requieren urgentemente de cartografía no sólo en México sino en otras regiones de América.

Materiales y métodos

Área de estudio

El complejo estuarino de manglar Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas (fig. 1) es considerado uno de los más grandes en su tipo en la costa del Pacífico del continente americano, con alrededor de 80,000 ha de manglares y 150,000 ha de marismas. El sistema cuenta con numerosas lagunas, incluyendo la extensa Laguna de Agua Brava, y tiene dos entradas, una natural en Teacapán y otra artificial, abierta en 1971, conocida como el Canal de Cuautla (>15 m de profundidad y >1000 m de ancho). Una importante característica natural de esta zona es la presencia de 150 barras de arena semiparalelas, con manglares, que son resultado de la transgresión del Holoceno y el aporte de sedimento fluvial (Curry *et al.* 1969). Además de las descargas estacionales de los ríos Cañas, Rosamorado y Bejuco, el sistema recibe el aporte de dos ríos permanentes, el Acaponeta y el San Pedro.

En las secciones norte y sur del sistema predominan el mangle negro (*Avicennia germinans*) y el mangle blanco

degradation. Using optical satellite imagery, recent studies (Kovacs *et al.* 2001, 2004, 2005) have shown that extensive areas of dead and poor condition mangrove are now commonplace throughout this system. It has been suggested by scientists and local people alike (Flores-Verdugo *et al.* 1997, Kovacs 2000) that hydrologic changes, elevated salinity levels in particular, following the opening of the Cuautla Canal have and continue to adversely impact the mangroves. Consequently, the various conditions of mangrove that can be found include healthy tall mangrove, healthy mangrove, poor condition mangrove, and dead stands (fig. 2). The healthy tall mangroves, which are commonly found at the water's edge, consist of either luxuriant red mangrove alone or in association with tall black (north section) or tall white (south section) mangrove. Healthy mangroves consist mainly of homogeneous stands of short, less than 5 m, black and white mangroves that are found in the north and south sections of the system, respectively. In the north section, there are extensive areas of

(*Laguncularia racemosa*), respectivamente. El mangle rojo (*Rhizophora mangle*) se encuentra a lo largo de las lagunas y los estuarios y, en la sección sur, puede formar islas homogéneas relativamente grandes. Los manglares de este sistema, a pesar de ser extremadamente productivos (Flores-Verdugo *et al.* 1990) y de ser considerados por los habitantes locales un valioso recurso renovable (Kovacs 1999), han sufrido una extensa degradación. Trabajos recientes con imágenes de satélites ópticos (Kovacs *et al.* 2001, 2004, 2005) han mostrado que es común observar grandes áreas de manglar muerto o en condiciones pobres en todo el sistema. Tanto los científicos como los habitantes locales (Flores-Verdugo *et al.* 1997, Kovacs 2000) consideran que los cambios hidrológicos, en particular los elevados niveles de salinidad, ocasionados por la apertura del Canal de Cuautla, han tenido y continuarán teniendo un impacto adverso sobre los manglares. Como consecuencia, actualmente es posible encontrar manglar en diferentes condiciones: sano alto, sano, pobre y muerto (fig. 2). El manglar sano alto, que comúnmente se encuentra bordeando el agua, está formado por mangle rojo tupido, ya sea solo o asociado con mangle negro alto (sección norte) o blanco alto (sección sur). El manglar sano está formado principalmente de tallos homogéneos de mangles negro y blanco, pequeños, de menos de 5 m de altura, que se encuentran en las secciones norte y sur del sistema, respectivamente. En la parte norte se encuentran extensas áreas de este mangle negro que ahora podría considerarse una variante enana de su estado anterior (i.e., antes del Canal de Cuautla). El manglar pobre está en las zonas que alguna vez mantenían un tupido crecimiento pero que ahora sólo tienen árboles muy viejos con unas cuantas hojas, intercalados con tallos muertos y algunos manglares enanos. En algunas de estas áreas también se puede encontrar *Salicornia bigelovii* y/o *Batis maritima*, ambas indicadoras de condiciones hipersalinas. Estas dos especies de halófitas ocasionalmente se encuentran en las zonas de manglar muerto, o cementerios de mangle, formados principalmente por tallos muertos. Tanto el manglar muerto como el pobre parecen limitarse a árboles de *A. germinans* y *L. racemosa* localizados en las secciones norte y sur del sistema, respectivamente. La única excepción a este patrón general se observa en la zona de las barras de arena semiparalelas de Las Haciendas, con un gradiente topográfico relativamente alto que permite una clara zonificación del mangle, tanto blanco como negro, cuyas condiciones y densidades son relativamente similares.

El complejo de manglares está rodeado por una zona donde se realiza agricultura intensiva que abarca seis municipios, uno perteneciente al estado de Sinaloa, al norte, y cinco al estado de Nayarit, al sur. En total, la región mantiene una población de aproximadamente 390,000 habitantes, la mayoría de los cuales se dedican a la agricultura o actividades relacionadas con ésta (INEGI 1999, 2005). En Escuinapa, el único municipio de Sinaloa que forma parte del complejo, se encuentran la ciudad de Escuinapa y el puerto de Teacapán. Los cinco municipios de Nayarit son Tecuala, Acaponeta, Rosamorada, Tuxpan y Santiago Ixcuintla. Durante el ciclo agrícola primavera-verano

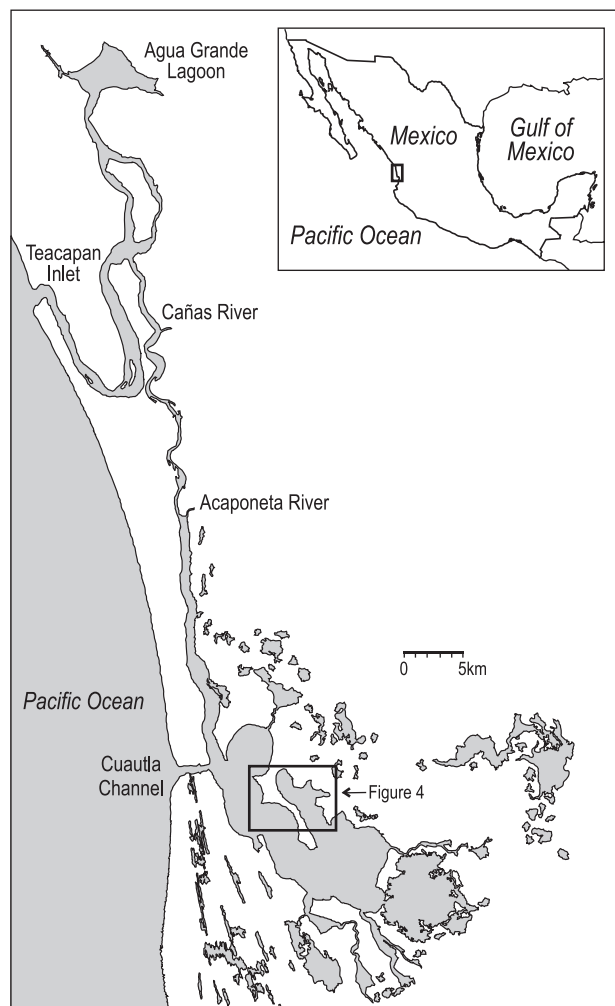


Figure 1. Location of the Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas estuarine-mangrove complex, Mexican Pacific.

Figura 1. Localización del complejo estuarino de manglar Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas, en la costa del Pacífico mexicano.

these black mangroves that could now be considered simply dwarf variants of their former state (i.e., pre-Cuautla Canal). Poor condition mangroves represent areas that once supported luxuriant growth but now consist of very old trees with few leaves interspersed with dead mangrove stems and some dwarf mangroves. In some of these areas, dwarf glasswort (*Salicornia bigelovii*) and/or saltwart (*Batis maritima*) can also be found, both indicative of hypersaline conditions. These two non-mangrove species can sometimes be found in the dead mangrove areas, or mangrove cemeteries, which consist primarily of dead mangrove stumps. These two latter mangrove conditions, poor and dead, appear to be limited only to the *A. germinans* and *L. racemosa* trees located in the north and south sections, respectively, of the system. The only exception to this general pattern is found on the Las Haciendas semi-parallel sand barriers, where the relatively high topographic gradient of the sand barriers allows a clear zonation of both white and black mangroves in similar relative densities and condition.

Surrounding the mangrove complex is an intensive agricultural zone that is organized into six municipalities (counties) within the states of Sinaloa in the north and Nayarit in the south. In total, this region supports a population of roughly 390,000 inhabitants, the majority of whom are involved in the agricultural sector (INEGI 1999, 2005). The one municipality of Sinaloa represented in this region, Escuinapa, contains the city of Escuinapa and the port of Teacapán. The five municipalities of Nayarit include Tecuala, Acaponeta, Rosamorada, Tuxpan, and Santiago Ixcuintla. During the spring-summer agricultural cycle, roughly April until September, the crops produced include maize, sorghum for cattle, cantaloupe, rice, and watermelon, and in less quantities green pepper, cucumber, tomato, and tobacco. The amount of land dedicated to these crops varies from state to state, with the region of Escuinapa (Sinaloa) and the combined municipalities of Nayarit contributing about 3,829 and 46,846 ha of land, respectively, on an annual basis. During the autumn-winter cycle, roughly November until February, the Sinaloa municipality of Escuinapa reports no official agricultural contribution. In contrast, the municipalities of Nayarit in this region report approximately 59,165 ha in use, primarily for the production of cattle grains but also beans. This region of Nayarit also commits 13,420 ha to permanent crops, including mangoes (6,480 ha), sugar cane (2,445 ha), coffee (1,080 ha), and a few areas for bananas, avocados, limes, pineapples, oranges, and papaya. Mangoes are an important product of Escuinapa but no current official records are available.

In addition to mango (*Mangifera indica*) and coconut trees (*Cocos nucifera*), the terrestrial tree (i.e., non-mangrove) contingent for this alluvial plain includes some spots of remnant subperenifolious medium tropical forest dominated by the palm *Orbignya cohune*. Low deciduous tropical forests can also be found dispersed within the agricultural areas. Specifically, *Lysiloma divaricata* and *Acacia cymbispina* are commonly found, but other species that may also be encountered include *Cochlospermum vitifolium*, *Vitex pyramidata*,

(aproximadamente de abril a septiembre) se cultivan maíz, sorgo forrajero, melón, arroz y sandía, y en menores cantidades pimienta verde, pepino, tomate y tabaco. Aunque las extensiones agrícolas varían de estado a estado, Escuinapa (Sinaloa) dedica anualmente alrededor de 3,829 ha a estos cultivos, mientras que los municipios de Nayarit, combinados, dedican 46,846 ha. Durante el ciclo otoño-invierno (aproximadamente de noviembre a febrero) Escuinapa oficialmente no registra contribución agrícola alguna; en contraste, los municipios de Nayarit en la región registran un uso de aproximadamente 59,165 ha principalmente para la producción de sorgo forrajero y frijol. Esta región de Nayarit también destina 13,420 ha a cultivos permanentes incluyendo mango (6,480 ha), caña de azúcar (2,445 ha) y café (1,080 ha), así como en algunas zonas se produce plátano, aguacate, limón verde, piña, naranja y papaya. El mango es un producto importante de Escuinapa pero no hay registros oficiales disponibles sobre su cosecha.

Además de árboles de coco (*Cocos nucifera*) y mango (*Mangifera indica*), el contingente de árboles terrestres (i.e., no manglar) de esta llanura aluvial incluye algunos remanentes de bosque tropical mediano subperenifolio dominados por la palma *Orbignya cohune*. Entre las zonas agrícolas también se encuentran áreas de bosque tropical bajo caducifolio. Específicamente, son comunes *Lysiloma divaricata* y *Acacia cymbispina*, pero también se pueden encontrar *Cochlospermum vitifolium*, *Vitex pyramidata*, *Gliciridia sepium*, *Guazuma ulmifolia*, *Byrsonima crassifolia*, *Erytroxylon mexicanum*, *Pachycereus pecten-aboriginum*, *Bursera* sp., *Acacia farnesiana*, *A. pennatula* y *Cassia biflora*.

La región corresponde a la provincia fisiográfica de la planicie del delta del Río Santiago, con una temperatura media anual de 26°C a 28°C (cálido tropical) y una precipitación anual que varía de 800 mm en el norte a 1500 mm en el sur. La geología de la región consiste principalmente de depósitos aluviales y rocas sedimentarias volcánicas de la era Cenozoica.

La región se considera un importante centro de historia cultural. El sistema Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas fue extensamente poblado durante tiempos prehispánicos. La presencia de varios miles de conchas de ostión y conchales de *Tivela* spp., algunos de más de 2000 años de antigüedad, es una indicación de asentamientos humanos tempranos. De hecho, se cree que el pueblo pesquero de Mexcaltitán, localizado en una isla con manglares, fue el origen del grupo migratorio que eventualmente fundó la ciudad de Tenochtitlán, ahora la Ciudad de México.

Recolección de datos y diseño experimental

Se adquirieron imágenes de ENVISAT ASAR de doble polarización (banda C) del 9, 15, 24 y 30 de mayo de 2004. Los datos correspondientes al 9 y 30 de mayo se recolectaron en la posición 6 del haz (39.1°–42.8°), mientras que los del 15 y 24 de mayo se recolectaron en la posición 2 (19.2°–26.7°). La toma del 15 de mayo fue la más extensa geográficamente, por lo que todos los demás datos registrados se tomaron con una



Figure 2. Present condition of mangroves in the Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas estuarine-mangrove complex (Mexico). Examples of dead (a), poor condition (b), healthy (c), and tall healthy stands (d) of the black mangrove (*Avicennia germinans*).

Figura 2. Condición actual de los manglares en el complejo estuarino Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas (México). Ejemplos de manglares muertos (a), pobres (b), sanos (c) y sanos y altos (d) del mangle negro (*Avicennia germinans*).

Gliciridia sepium, *Guazuma ulmifolia*, *Byrsonima crassifolia*, *Erythroxylon mexicanum*, *Pachycereus pecten-aboriginum*, *Bursera* sp., *Acacia farnesiana*, *A. pennatula*, and *Cassia biflora*.

The region corresponds to the physiographic province of the Santiago River delta plain, maintaining a mean annual temperature between 26°C and 28°C (tropical warm), with annual rainfall that varies from 800 mm in the north to 1500 mm in the south. The geology of the region is primarily alluvial deposits and volcanic sedimentary rock from the Cenozoic era.

The region is considered an important center of cultural history. Specifically, the Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas system was extensively populated during prehispanic times. The presence of several thousand oyster shells and *Tivela* spp. middens (small hills of shells), some as old as 2000 years, are reference to these early human settlements. In fact, the fishing town of Mexcaltitán, located on an inland within the mangroves, is believed to be the origin of a migratory aboriginal group that eventually founded the city of Tenochtitlán, now Mexico City.

Data collection and experimental design

Dual-polarized ENVISAT ASAR (C-band) images were acquired for 9, 15, 24, and 30 May 2004. The 9 and 30 May data were collected at beam position 6 (39.1°–42.8°), whereas the 15 and 24 May data were collected at beam position 2 (19.2°–26.7°). Since the 15 May scene had the largest geographical extent, all other data were registered, with a sub-pixel accuracy, to this scene. To reduce file size and, consequently, computational time, the images were then linearly scaled from 11-bit to 8-bit data (Arzandeh and Wang 2002). Although several filters were examined (e.g., Gamma, Lee, Kuan) for their ability to remove noise while keeping detailed information, an enhanced Lee filter, at a 5 by 5 window size, was selected and applied to these data (Kushwaha et

menor precisión de pixel. Para reducir el tamaño de los archivos y, consecuentemente, el tiempo de cómputo, las imágenes se redujeron linealmente de 11 a 8 bits (Arzandeh y Wang 2002). No obstante se evaluó la capacidad de varios filtros (e.g., Gamma, Lee, Kuan) para eliminar el ruido sin perder detalles de la información, para trabajar los datos se seleccionó y utilizó un filtro tipo Lee mejorado, con un tamaño de ventana de 5 por 5 (Kushwaha et al. 2000, Racine et al. 2005, Choudhury y Chakraborty 2006). Para determinar la precisión cartográfica de los datos se realizó una clasificación supervisada de los mismos usando un algoritmo de máxima probabilidad, a diferentes polarizaciones y ángulos de incidencia, y con diferentes combinaciones de datos (Ozesmi y Bauer 2002, Racine et al. 2005). Los sitios de ensayo se seleccionaron con base en un amplio trabajo de campo, fotografías aéreas y varias escenas de IKONOS y datos de QuickBird. Se utilizó el mismo procedimiento de clasificación en los mismos sitios de ensayo, con una escena de Landsat TM del 1 de mayo de 2005, aproximadamente en la misma temporada de las imágenes de ENVISAT ASAR. Además, se evaluó un método para mejorar la clasificación de manglares usando las dos fuentes de datos complementarias. Para evaluar la precisión de los procedimientos, se utilizó una muestra aleatoria estratificada de 978 sitios (Congalton 1991) que no incluyó las zonas de ensayo; sin embargo, al igual que con los sitios de ensayo, para su verificación se usaron datos de campo, fotografías aéreas y datos de satélite ópticos de muy alta resolución. El trabajo de campo se basó en varias campañas recientes (2001, 2002, 2004, 2007, 2008), de dos meses de duración, en el área de estudio. Según los posibles requerimientos de detalle se consideraron dos esquemas de clasificación: uno de seis clases que incluyó solamente una clase de manglar, una de bosque terrestre combinado, una urbana, una agrícola, una de aguas libres de vegetación y una de marisma; y otro en el que la clase de manglar se subdividió en las cuatro típicas condiciones de estos manglares (muerto, pobre, sano y sano alto) y el bosque de

al. 2000, Racine *et al.* 2005, Choudhury and Chakraborty 2006). A supervised classification procedure, using a maximum likelihood algorithm, was then applied to test the mapping accuracies of these data at different polarizations, different incidence angles, and using different combinations of data (Ozesmi and Bauer 2002, Racine *et al.* 2005). The training sites were selected based on extensive field work, aerial photographs, and several scenes of IKONOS and QuickBird data. The same classification procedure, using the same training sites, was also applied to a Landsat TM scene dated 1 May 2005, approximately the same season as the ENVISAT ASAR imagery. In addition, a method for improving the classification of magrove forests using the two complementary data sources was examined. A stratified random sample of 978 locations was then used to assess the accuracies of these procedures (Congalton 1991). This test sample did not include areas used for the training sites; however, as with the training sites, the field work, aerial photographs, and very high resolution optical satellite data were used for the verification. The field work was based on a number of recent two-month-long campaigns (2001, 2002, 2004, 2007, 2008) to the study area. Based on the possible demands of detail required, two classification schemes were considered. First, a six-class scheme was examined that included only one mangrove class, a combined terrestrial forest class, an urban class, an agriculture class, an open water class, and a saltpan (*marisma*) class. In the second scheme, the mangrove class was subdivided into the four conditions typical of this system (dead, poor condition, healthy, tall healthy) and the palm forest was separated from other terrestrial counterparts. The once expansive palm forest, represented by *Orbignya cohune*, has unique optical properties in comparison to other terrestrial tree species and, although found on the endangered species list, is still under threat from agricultural activities.

Results

When considering a classification procedure that included only one mangrove class, the results (table 1) indicated that to improve the separation of these trees from other land covers/uses more than one polarization should be used; however, it is also evident that the use of three, as opposed to two, polarizations only slightly improves the accuracies. When considering the optimal beam position for this endeavor, with the exception of the HH + VV combination, all of the results indicated that a larger incidence angle was best. Although the beam position 2 HH + VV combination depicted slightly higher accuracies than the beam position 6 HH + VV + VH combination, the latter arrangement produced a higher overall accuracy (45% vs 41%) when the more elaborate classification procedure (i.e., four mangrove classes) was considered. Consequently, the beam position 6 HH + VV + VH combination will be considered the ideal SAR grouping and thus used for comparison with the optical data. In comparison with the Landsat TM data, the overall classification accuracy (table 1) was much lower for the SAR combination (76% vs 54%).

palma se separó de sus contrapartes terrestres. El otrora extenso bosque de palma, representado por *Orbignya cohune*, presenta propiedades únicas en comparación con las otras especies de árboles terrestres y, a pesar de encontrarse en la lista de especies en peligro de extinción, sigue estando amenazado por las actividades agrícolas.

Resultados

Cuando el procedimiento de clasificación incluyó sólo una clase de manglar, los resultados (tabla 1) indicaron que para mejorar la distinción de estos árboles de otras coberturas o usos del suelo era necesario utilizar más de una polarización; sin embargo, también es evidente que utilizar tres polarizaciones, en vez de dos, sólo mejora ligeramente la precisión. Al considerar en este trabajo la posición óptima del haz, con excepción de la combinación HH + VV, todos los resultados indicaron que un mayor ángulo de incidencia era mejor. Aunque la combinación HH + VV de la posición 2 del haz proporcionó una precisión ligeramente mayor que la combinación HH + VV + VH de la posición 6, este último arreglo produjo una mayor precisión global (45% vs 41%) con el procedimiento de clasificación más elaborado (i.e., cuatro clases de mangle), y por tanto éste se consideró la combinación ideal del SAR y se empleó para la comparación con los datos ópticos. En comparación con los datos de Landsat TM, la precisión global de la clasificación (tabla 1) fue mucho menor para la combinación del SAR (76% vs 54%). Además, aunque las precisiones del usuario fueron similares (tablas 2, 3), las del productor difirieron considerablemente (97% vs 57%). Después de revisar más a fondo las matrices de confusión, fue evidente que las clasificaciones erróneas del manglar como otros tipos de cobertura o usos del suelo también difirieron notablemente. Específicamente, para el procedimiento con datos ópticos los errores de comisión se originaron principalmente en las coberturas de tipo marisma y agua libre de vegetación, mientras que para la clasificación de datos de SAR, éstos se originaron en las de bosque terrestre y zona agrícola.

En el proceso de clasificación más elaborado (tablas 4, 5; fig. 3), que incluye las cuatro clases de manglar, los resultados mostraron que las principales fuentes de error para las clasificaciones ópticas pueden atribuirse a las dos clases de manglar no ideales (i.e., las de follaje degradado), esto es, a la pobre pero más bien a la de manglar muerto. En particular, las clases de marisma y agua libre eran clasificadas erróneamente como manglar muerto. La mayoría de las demás clasificaciones erróneas se dieron entre las clases de manglar más similares. Por ejemplo, los manglares muertos se confundían fácilmente con los pobres, y los sanos altos con los sanos. Esta confusión también fue evidente, aunque en menor medida, en la clasificación correspondiente derivada de datos de SAR, en la que la clasificación global también fue mucho menos precisa que con los datos de Landsat TM. En contraste a lo ocurrido con los datos ópticos, las zonas agrícolas se confundieron con manglares tanto muertos como pobres. Además, tanto los manglares

Moreover, although the user's accuracies were somewhat similar (tables 2, 3), the producer's accuracies did differ considerably (97% vs 57%). Upon further examination of the two confusion matrices, it is evident that the misclassifications of mangrove with other land cover/use types also differ noticeably. Specifically, for the optical data procedure the commission errors originated principally from the water and saltpan cover types, as opposed to terrestrial forests and agricultural areas for the SAR data classification.

From the more elaborate classification process (tables 4, 5; fig. 3), which includes the four mangroves classes, the results showed that the main sources of error for the optical classifications can be linked to the two non-ideal mangrove classes (i.e., degraded canopies): the poor condition mangrove but rather to the dead mangrove class. In particular, water and saltpan were being misclassified as dead mangrove. Most other mangrove

sanos como los sanos altos fueron predominantemente mal clasificados ya fuera como palmas u otro bosque terrestre y viceversa. Dada la mayor precisión de la clasificación global obtenida con los datos ópticos pero su uso limitado para la identificación de tallos muertos (i.e., confusión con aguas libres y marismas), se determinó que lo más recomendable para cartografiar manglares degradados sería utilizar un procedimiento de dos pasos que incluya los datos de ASAR. Las zonas clasificadas por Landsat como de tallos muertos se eliminaron y se volvieron a clasificar usando el mejor modo de haz del ASAR para distinguirlos de los espejos de agua y las marismas (fig. 4). Usando la posición 6 de haz HH (~41°), el número de zonas de aguas libres y marismas, clasificadas erróneamente como zonas muertas usando solamente los datos de Landsat, se redujo considerablemente de 55 y 26 a 3 y 3, respectivamente.

Table 1. Comparison of the mangrove class mapping success using Landsat TM and ENVISAT ASAR data.

Tabla 1. Comparación de la precisión de la cartografía de las clases de manglar usando datos de Landsat TM y ENVISAT ASAR.

Beam position	Data	Overall accuracy	User's accuracy	Producer's accuracy
NA	Landsat TM ⁺	76	74	97
6 (~41°)	HH + VV + VH	54	62	57
2 (~23°)	HH + VV + VH	51	65	52
6 (~41°)	HH + VV	52	64	54
2 (~23°)	HH + VV	55	63	61
6 (~41°)	HH + VH	51	59	53
2 (~23°)	HH + VH	48	63	51
6 (~41°)	VV + VH	50	59	56
2 (~23°)	VV + VH	47	59	47
6 (~41°)	HH	41	67	12
2 (~23°)	HH	38	71	31
6 (~41°)	VV	48	58	42
2 (~23°)	VV	47	57	59
6 (~41°)	VH	48	52	62
2 (~23°)	VH	38	50	33

Table 2. Confusion matrix for the land cover/use classification using Landsat TM data.

Tabla 2. Matriz de confusión para la clasificación de coberturas o usos de la tierra usando datos de Landsat TM.

	Mangrove	Terrestrial forest	Urban	Water	Agriculture	Saltpan	
Mangrove	306	5	0	67	6	27	0.74
Terrestrial forest	0	85	0	0	8	0	0.91
Urban	1	0	18	0	33	32	0.21
Water	0	0	0	114	0	0	1.00
Agriculture	8	22	2	1	186	7	0.82
Saltpan	0	0	0	1	14	35	0.70
	0.97	0.76	0.90	0.62	0.75	0.35	

Table 3. Confusion matrix for the land cover/use classification using ENVISAT ASAR data (HH+VV+VH, position 6).**Tabla 3.** Matriz de confusión para la clasificación de coberturas o usos de la tierra usando datos de ENVISAT ASAR (HH+VV+VH, position 6).

	Mangrove	Terrestrial forest	Urban	Water	Agriculture	Saltpan	
Mangrove	178	54	5	4	36	10	0.62
Terrestrial forest	91	40	4	8	27	0	0.24
Urban	4	1	8	6	4	4	0.30
Water	0	1	0	96	0	5	0.94
Agriculture	37	15	2	26	156	35	0.58
Saltpan	5	1	1	43	24	47	0.39
	0.57	0.36	0.40	0.52	0.63	0.47	

Table 4. Confusion matrix for the land cover/use classification using Landsat TM data and considering four mangrove classes.**Tabla 4.** Matriz de confusión para la clasificación de coberturas o usos de la tierra usando datos de Landsat TM y considerando cuatro clases de manglar.

	Dead mangrove	Poor condition	Healthy mangrove	Healthy tall	Palm	Terrestrial forest	Urban	Water	Agriculture	Saltpan
Dead mangrove	42	21	5	0	0	0	0	55	4	26
Poor condition	2	31	23	0	0	1	0	10	2	1
Healthy mangrove	0	3	80	45	0	3	0	2	0	0
Healthy tall	0	0	1	53	0	1	0	0	0	0
Palm	0	0	0	0	29	24	0	0	0	0
Terrestrial forest	0	0	0	0	1	31	0	0	8	0
Urban	0	1	0	0	0	0	18	0	33	32
Water	0	0	0	0	0	0	0	114	0	0
Agriculture	0	4	4	0	0	22	2	1	186	7
Saltpan	0	0	0	0	0	0	0	1	14	35

Table 5. Confusion matrix for the land cover/use classification using ENVISAT ASAR data (HH+VV+VH, position 6) and considering four mangrove classes.**Tabla 5.** Matriz de confusión para la clasificación de coberturas o usos de la tierra usando datos de ENVISAT ASAR (HH+VV+VH, position 6) y considerando cuatro clases de manglar.

	Dead mangrove	Poor condition	Healthy mangrove	Healthy tall	Palm	Terrestrial forest	Urban	Water	Agriculture	Saltpan
Dead mangrove	8	5	3	1	1	3	1	3	18	8
Poor condition	3	7	17	7	1	8	4	0	1	0
Healthy mangrove	5	8	39	11	5	13	0	1	9	2
Healthy tall	3	5	9	47	6	17	0	0	8	0
Palm	8	17	23	15	13	17	4	8	27	0
Terrestrial forest	0	2	14	12	3	7	0	0	0	0
Urban	0	2	0	2	0	1	8	6	4	4
Water	0	0	0	0	1	0	0	96	0	5
Agriculture	15	11	8	3	0	15	2	26	156	35
Saltpan	2	3	0	0	0	1	1	43	24	47

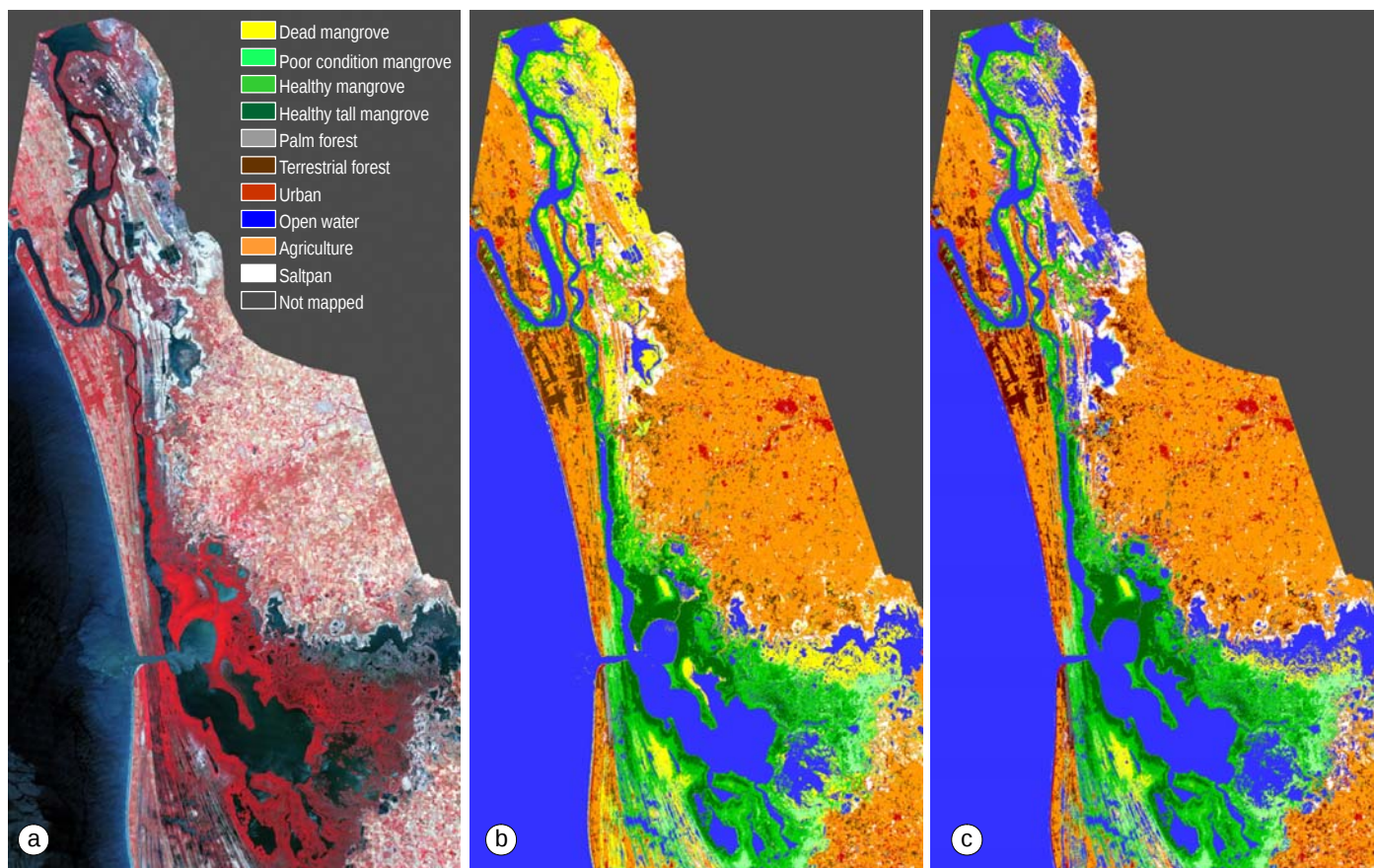


Figure 3. Results of the mapping procedures using either ENVISAT ASAR or Landsat optical data. (a) Landsat TM false color composite (4, 3, 2), (b) classification using Landsat TM data, and (c) classification combining Landsat TM data and ENVISAT ASAR data.

Figura 3. Resultados de los procedimientos cartográficos usando ya sea datos del ENVISAT ASAR u ópticos del Landsat. (a) Compuesto en color falso de Landsat TM (4, 3, 2), (b) clasificación usando datos de Landsat TM y (c) clasificación usando datos combinados de ENVISAT ASAR y Landsat TM.

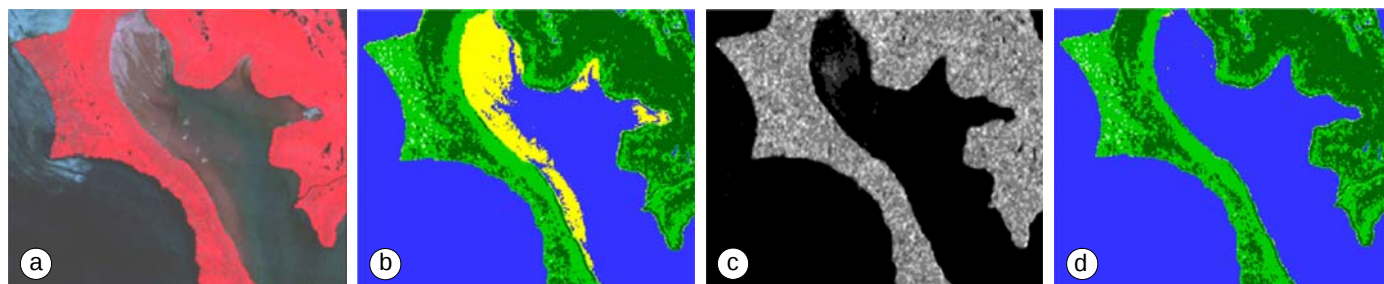


Figure 4. Improving the classification of mangroves using both optical and SAR data. Note how the misclassified dead mangrove areas are removed from the initial optical classification using a secondary classification with SAR data. (a) Landsat TM false color composite (4, 3, 2), (b) classification using Landsat TM data, (c) Lee-filtered ENVISAT ASAR HH position 6 data, and (d) classification using both Landsat TM and ENVISAT ASAR data.

Figura 4. Mejora de la clasificación de manglares usando datos ópticos y del SAR. Observe como las zonas de manglar muerto clasificadas erróneamente se eliminan de la clasificación óptica inicial usando una clasificación secundaria con datos de SAR. (a) Compuesto en color falso de Landsat TM (4, 3, 2), (b) clasificación usando datos de Landsat TM, (c) datos de la posición 6 HH de ENVISAT ASAR filtrados con un filtro tipo Lee y (d) clasificación usando tanto datos de Landsat TM como de ENVISAT ASAR.

classification errors were limited to misclassifications between more similar mangrove classes. For example, dead and tall mangroves were more readily misclassified with poor condition and healthy condition mangroves, respectively. This pattern was also evident, although not as obvious, in the corresponding SAR classification. Again, the overall classification

Discusión

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran la utilidad de usar datos de ENVISAT ASAR para mejorar la elaboración de mapas realizados únicamente con datos ópticos de Landsat, especialmente para el monitoreo de bosques de

accuracy was much lower for the SAR data than for the Landsat TM. In contrast to the optical data, agriculture was confused with both dead and poor condition mangrove. Moreover, both healthy and tall healthy mangroves were being predominantly misclassified as either palm or other terrestrial forests and vice versa. Given the much higher overall classification accuracy with the optical data but limited use in identifying dead stands (i.e., confusion with open water and saltpan), it was determined that a two-step procedure, which includes the ASAR data, could be used to better map such degraded canopies. Specifically, the dead stand areas classified by Landsat were masked out and a second classification was applied to these areas using the best ASAR beam mode to separate these trees from water and saltpan (fig. 4). Using HH beam position 6 ($\sim 41^\circ$), the number of open water and saltpan areas misclassified as dead stands, using the Landsat data alone, was considerably reduced from 55 and 26 to 3 and 3, respectively.

Discussion

From the results of this investigation, it is apparent that ENVISAT ASAR data would be best used as a means of improving Landsat optical data mapping, specifically when monitoring degraded mangrove forests of the Pacific coast of Mexico. However, if no optical data are available, it is suggested that at least two polarizations be used in the classification procedure and that a shallower depression angle be selected. Although the ideal SAR combination selected revealed a 54% overall accuracy for the single mangrove class classification, the difficulty of dealing with a degraded system must be taken into consideration. It does appear from this study that the dead and poor condition mangroves create confusion not only for the SAR but also for the optical data. For the optical imagery, the lack of healthy trees and the presence of saturated soils or flooded waters within these areas could likely explain why their optical signatures, especially in the near infrared, could be similar to water and saltpan sites. Conversely, the debris from dead fallen branches or scarce leaf coverage as well as the presence of some low growing sparse saltwort and glasswort could mirror the geometric pattern of select agricultural crops and/or fallow fields and thus explain why, for SAR, agriculture was most confused with mangrove. Moreover, the confusion of mangroves, in particular the healthy ones, with terrestrial forests, including palm, could be expected given the lack of canopy penetration by C-band (Leckie and Ranson 1998). Similar high depolarization would be expected from all trees resulting from canopy volume scattering saturation (Hess *et al.* 1990). Mapping of these four mangrove classes is also difficult for SAR. The limited ability of c-band SAR to penetrate through forest canopy hinders the separation of the three mangrove species under study even though they differ considerably from one another in canopy structure (e.g., leaf size, leaf clusters, etc.). Even if SAR penetrates the canopy the root architecture also varies dramatically. For example, the red mangrove has extensive

manglar degradados en la costa del Pacífico mexicano. Sin embargo, en caso de no existir datos ópticos se sugiere utilizar por lo menos dos polarizaciones en el procedimiento de clasificación y seleccionar un mayor ángulo de incidencia. Aunque el arreglo ideal del SAR seleccionado mostró una precisión global de 54% para la clasificación usando una sola clase de manglar, es necesario considerar la dificultad de tratar con un sistema degradado. En este estudio se observó que los manglares en condiciones pobres o muertos crean confusión no sólo para el SAR sino también para los datos ópticos. Para las imágenes ópticas, la ausencia de árboles sanos y la presencia de tierras saturadas o aguas crecidas dentro de estas zonas podría explicar por qué sus señales ópticas, especialmente en el infrarrojo cercano, pueden ser similares a las de zonas de agua libres y de marismas. Por lo contrario, los restos de ramas muertas o un follaje pobre, así como la presencia de *Salicornia bigelovii* y *Batis maritima* que no crecen mucho, podrían semejar el patrón geométrico de ciertos cultivos agrícolas o campos sin cultivar, y así explicar por qué, según los datos de SAR, las zonas agrícolas se confunden con los manglares. Asimismo, la confusión de los manglares, en particular de los sanos, con bosques terrestres incluyendo los de palma, era de esperarse dada la falta de penetración de la banda C en el follaje (Leckie y Ranson 1998). Sería de esperarse una alta despolarización similar de todos los árboles a partir de la saturación de dispersión del volumen de follaje (Hess *et al.* 1990). La cartografía de estas cuatro clases de manglar también resulta difícil para el SAR ya que las tres especies de mangle involucradas difieren considerablemente entre sí en cuanto a la estructura de su follaje (e.g., tamaño de hoja, disposición de las hojas, etc.). Aun cuando el SAR penetrara el follaje, la arquitectura de las raíces también varía significativamente. Por ejemplo, el mangle rojo tiene profusas raíces de sostén, mientras que el mangle negro produce un gran número de neumatóforos.

Considerando que el complejo de Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas se encuentra altamente degradado, no es de sorprender que la precisión, aún para los datos ópticos, no resultara tan alta como la de estudios previos. Sin embargo, las áreas de manglares prístinos no son muy comunes y, por lo tanto, resulta esencial estudiar este tipo de sistemas. Para la futura elaboración de mapas de estos manglares sería recomendable incluir el uso de datos de la banda C de RadarSat-2, de mayor resolución espacial, o de la banda L de ALOS PALSAR, cuya penetración en el follaje es mayor.

Traducido al español por Christine Harris.

prop roots, whereas the black mangrove grows numerous pneumatophores.

Given the fact that the Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas complex is highly degraded, it is not surprising that accuracies, even for the optical, were not as high as those of previous studies. Nevertheless, pristine mangrove areas are not

common and it is therefore essential that these types of systems be examined. Future considerations in mapping such mangroves with SAR may include the use of higher spatial resolution C-band RadarSat-2 or greater canopy penetrating L-band ALOS PALSAR data.

References

- Arzandeh S, Wang J. 2002. Texture evaluation of Radarsat imagery for wetland mapping. *Can. J. Remote Sens.* 28: 653–666.
- Aschbacher J, Ofren R, Delsol JP, Suselo TB, Vibulsresth S, Charrupat T. 1995. An integrated comparative approach to mangrove vegetation mapping using advanced remote sensing and GIS technologies: preliminary results. *Hydrobiologia* 295: 285–294.
- Beland M, Goita K, Bonn F, Pham TTH. 2006. Assessment of land-cover changes related to shrimp aquaculture using remote sensing data: A case study in the Giao Thuy District, Vietnam. *Int. J. Remote Sens.* 27: 1491–1510.
- Choudhury I, Chakraborty M. 2006. SAR signature investigation of rice crop using Radarsat data. *Int. J. Remote Sens.* 27: 519–534.
- Congalton RG. 1991. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 37: 35–46.
- Curran JR, Emmel FJ, Crampton PJS. 1969. Holocene history of a strand plain, lagoonal coast, Nayarit, Mexico. In: Ayala-Castañares A, Phleger FP (eds.), *Coastal Lagoons, a Symposium. Memoir of the International Symposium on Coastal Lagoons (Origin, Dynamics and Productivity)*. UNAM-UNESCO, pp. 63–100.
- Dwivedi RS, Rao BRM, Bhattacharya S. 1999. Mapping wetlands of the Sundarban Delta and its environs using ERS-1 SAR data. *Int. J. Remote Sens.* 20: 2235–2247.
- Flores-Verdugo FJ, González-Farías F, Ramírez-Flores F, Amezcua-Linares A, Yáñez-Arancibia M, Alvarez-Rubio, Day JW. 1990. Mangrove ecology, aquatic primary productivity, and fish community dynamics in the Teacapán-Agua Brava lagoon-estuarine system (Mexican Pacific). *Estuaries* 13: 219–230.
- Flores-Verdugo FJ, González-Farías F, Blanco-Correa M, Núñez-Pasten A. 1997. The Teacapán-Agua Brava Marismas Nacionales mangrove ecosystem on the Pacific coast of Mexico. In: Kjerfve B, Drude L, Diop EHS (eds.), *Mangrove Ecosystem Studies in Latin America and Africa*. UNESCO, pp. 35–46.
- Hess LL, Melack JM, Simonett DS. 1990. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: A review. *Int. J. Remote Sens.* 11: 1313–1325.
- INEGI. 1999. *Síntesis de Información Geográfica del Estado de Nayarit*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México DF, 152 pp.
- INEGI. 2005. *Anuario Estadístico del Estado de Sinaloa*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México DF, 617 pp.
- Kovacs JM. 1999. Assessing mangrove use at the local scale. *Landscape Urban Plann.* 43: 201–208.
- Kovacs JM. 2000. Perceptions of environmental change in a tropical coastal wetland. *Land Degrad. Dev.* 11: 209–220.
- Kovacs JM, Wang J, Blanco-Correa M. 2001. Mapping mangrove disturbances using multi-date Landsat TM imagery. *Environ. Manage.* 27: 763–776.
- Kovacs JM, Flores-Verdugo F, Wang J, Aspden LP. 2004. Estimating leaf area index of a degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite data. *Aquat. Bot.* 80: 13–22.
- Kovacs JM, Wang J, Flores-Verdugo F. 2005. Mapping mangrove leaf area index at the species level using IKONOS and LAI-2000 sensors. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 62: 377–384.
- Kovacs JM, Vandenberg CV, Flores-Verdugo F. 2006. Assessing fine beam RADARSAT-1 backscatter from a white mangrove (*Laguncularia racemosa* (Gaertner)) canopy. *Wetlands Ecol. Manage.* 14: 401–408.
- Kushwaha SPS, Dwivedi RS, Rao BRM. 2000. Evaluation of various digital image processing techniques for detection of coastal wetlands using ERS-1 SAR data. *Int. J. Remote Sens.* 21: 565–579.
- Leckie DG, Ranson KJ. 1998. Forestry applications using imaging radar. In: Henderson FM, Lewis AJ (eds.), *Manual of Remote Sensing*. 3rd Vol. 2: Principles and Applications of Imaging Radar. John Wiley & Sons, Toronto, pp. 435–509.
- Mougin E, Proisy C, Marty G, Fromard F, Puig H, Betoulle JL, Rudant JP. 1999. Multifrequency and multipolarization radar backscattering from mangrove forests. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 37: 94–102.
- Muttitanon W, Tripathi NK. 2005. Land use/land cover changes in the coastal zone of Ban Don Bay, Thailand, using Landsat TM data. *Int. J. Remote Sens.* 26: 231–2323.
- Ozesmi SL, Bauer M. 2002. Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecol. Manage.* 10: 381–402.
- Proisy C, Mougin E, Fromard F, Karam MA. 2000. Interpretation of polarimetric radar signatures of mangrove forests. *Remote Sens. Environ.* 71: 56–66.
- Proisy C, Mougin E, Fromard F, Trichon V, Karam MA. 2002. On the influence of canopy structure on the backscatter of mangrove forests. *Int. J. Remote Sens.* 23: 4197–4210.
- Racine M, Bernier M, Ouarda T. 2005. Evaluation of Radarsat-1 images acquired in fine mode for the study of boreal peatlands: A case study in James Bay, Canada. *Can. J. Remote Sens.* 31: 450–467.
- Simard M, De Grandi G, Saatchi S, Mayaux P. 2002. Mapping tropical coastal vegetation using JERS-1 and ERS-1 radar data with a decision tree classifier. *Int. J. Remote Sens.* 23: 1461–1474.
- Simard M, Zhang K, Rivera-Monroy VH, Ross MS, Ruiz PL, Castaneda-Moya E, Twilley RR, Rodriguez E. 2006. Mapping height and biomass of mangrove forests in Everglades National Park with SRTM elevation data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 72: 299–310.
- Thu PM, Populus J. 2007. Status and changes of mangrove forest in Mekong Delta: Case study in Tra Vinh, Vietnam. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 71: 98–109.
- Valiela I, Boen JL, York JK. 2001. Mangrove forests: One of the World's threatened major tropical environments. *BioScience* 51: 807–815.
- Walters BB, Rönnbäck P, Kovacs JM, Crona B, Hussain SA, Badola R, Primavera J, Dahdouh-Guebas F, Barbier E. 2008. Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: A review. *Aquat. Bot.* 89: 220–236.
- Wang L, Sousa WP, Gong P. 2004a. Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery. *Int. J. Remote Sens.* 25: 5655–5668.
- Wang L, Sousa WP, Gong P, Biging GS. 2004b. Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama. *Remote Sens. Environ.* 91: 432–440.

Recibido en septiembre de 2007;
aceptado en agosto de 2008.