



UNIVERSIDAD DEL MAR

CAMPUS PUERTO ESCONDIDO

DINÁMICA DEL USO DE SUELO EN EL MUNICIPIO DE SAN PEDRO MIXTEPEC, JUQUILA, OAXACA, EN EL PERIODO 1990-2010

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL

PRESENTA
JOSÉ ÁNGEL JIMÉNEZ CONTRERAS

DIRECTORA DE TESIS
M en C. GRICELDA VALERA VENEGAS

PUERTO ESCONDIDO MIXTEPEC, OAXACA AGOSTO 2012



Universidad del Mar

Puerto Escondido ~ Puerto Angel ~ Huatulco

O A X A C A

Puerto Escondido, San Pedro Mixtepec, Oaxaca., 16 de agosto de 2012

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Después de realizar una revisión detallada de la tesis “Dinámica del uso de suelo en el Municipio de San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca, en el periodo 1990-2010”, presentada por el pasante en Ingeniería Forestal José Ángel Jiménez Contreras, se considera que cumple con los requisitos y la calidad necesarios para ser defendida en el examen profesional.

COMISIÓN REVISORA

M. en C. Gricelda Valera Venegas
Universidad del Mar
Directora de Tesis

M. en C. Rolando Galán Larrea
Universidad del Mar
Revisor

L.P.T. Francisco Valdez Martínez
Universidad del Mar
Revisor

Dr. Edgar Iván Sánchez Bernal
Universidad del Mar
Revisor

M. en C. Celestino Sandoval García
Universidad del Mar
Revisor

Dedicatoria

A mis padres: José Jiménez López y Delfina Contreras López.

A mis hermanos: Pedro, María, Mayo, Rodo, Fely, Isa y Carlos.

Por la felicidad que les ocasiona este logro, que sin ellos no hubiera sido posible.

Agradecimientos

A Dios por estar siempre conmigo.

A toda mi familia por los consejos, apoyo y los sacrificios que se hicieron.

A mi directora de tesis M. en C. Gricelda Valera Venegas por la confianza y apoyo brindado en la realización de esta investigación.

A los revisores, quienes con sus observaciones y sugerencias enriquecieron este trabajo:
M. en C. Rolando Galán Larrea, L.P.T. Francisco Valdez Martínez, Dr. Edgar Iván Sánchez Bernal y M. en C. Celestino Sandoval García.

A los profesores, amigos y personas especiales que fueron un impulso para la culminación de este importante trabajo.

Por el gran apoyo...solo les puedo decir muchas gracias.

Contenido

Índice de tablas.....	iii
Índice de figuras	iv
Resumen	v
Abstract	vi
I. Introducción	1
II. Objetivos.....	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
III. Hipótesis.....	4
IV. Revisión de Literatura.....	4
4.1. Cambio de uso del suelo	4
4.2. Causas y consecuencias generales del cambio de uso del suelo a diferentes escalas.....	7
4.3. Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.).....	9
4.4. Satélites Landsat y Spot.....	11
4.5. Aplicación de los sensores remotos y SIG en los estudios de cambio de uso del suelo y coberturas forestales.....	13
V. Materiales.....	19
5.1. Área de estudio	19
5.1.1. Localización	19
5.1.2. Topografía y Orografía.....	20
5.1.3. Edafología.....	20
5.1.4. Clima	21
5.1.5. Hidrología	23
5.1.6. Usos del suelo y cobertura forestal	23
5.2. Material y equipo	29
VI. Métodos	31

6.1. Pre-procesamiento de las imágenes satelitales	31
6.1.1. Análisis visual y de la información estadística soporte de las imágenes	31
6.1.2. Recorte de las imágenes	32
6.1.3. Corrección geométrica	32
6.1.4. Realce de imágenes	33
6.1.5. Composición de colores.....	34
6.1.6. Identificación de clases	35
6.2. Clasificación supervisada de las imágenes de satélite	37
6.2.1. Análisis de la separabilidad espectral	39
6.3. Evaluación de la confiabilidad	39
6.4. Muestreo sobre mapas verificados y de campo.....	41
6.5. Análisis de la confiabilidad de la clasificación de las imágenes	42
6.6. Cálculo de la tasa de cambio.....	45
6.7. Transición de las clases en el tiempo	45
6.8. Generalización	46
VII. Resultados y Discusión	46
7.1. Identificación de clases	46
7.2. Clasificación supervisada	48
7.2.1. Análisis de la separabilidad espectral	51
7.3. Usos del suelo y coberturas forestales 1990-2010	53
7.4. Evaluación de la confiabilidad	59
7.5. Tasa de cambio.....	64
7.6. Transición de clases en el tiempo.....	67
VIII. Conclusiones.....	69
IX. Recomendaciones.....	71
X. Literatura Citada.....	73
XI. Anexos	94

Índice de tablas

Tabla I. Superficies a nivel nacional de los tipos de vegetación y usos de suelo en el Municipio de San Pedro Mixtepec, tomados del INF 2000-2001 y la SEMARNAT.....	7
Tabla II. Descripción de las imágenes de satélite utilizadas en el estudio.....	29
Tabla III. Estadísticas de las imágenes de satélite utilizadas en el estudio.	31
Tabla IV. Propiedades de los recortes de las imágenes.....	32
Tabla V. Categorías de usos del suelo y cobertura forestal y los criterios para su identificación en la composición en falso color de las imágenes Landsat (4-3-2) y Spot (3-2-1).....	36
Tabla VI. Grado de separabilidad entre firmas espectrales.	39
Tabla VII. Reclasificación de las categorías de la información tomada como real (INF 1994 y 2000).....	40
Tabla VIII. Categorías de usos del suelo y coberturas forestales identificadas para el Municipio de San Pedro Mixtepec, a través de la clasificación supervisada de las imágenes.	47
Tabla IX. Superficies de los usos del suelo y coberturas forestales para el Municipio de San Pedro Mixtepec 1990-2010.....	54
Tabla X. Matriz de error de la clasificación de los usos de suelo y cobertura forestal para el año 1990.....	61
Tabla XI. Matriz de error de la clasificación de los usos de suelo y cobertura forestal para el año 2000.....	62
Tabla XII. Matriz de error de la clasificación de los usos de suelo y cobertura forestal para el año 2010.....	63
Tabla XIII. Tasas de cambio de los usos del suelo y coberturas forestales en el Municipio de San Pedro Mixtepec.....	65
Tabla XIV. Matriz de transición de uso del suelo y cobertura forestal del Municipio de San Pedro Mixtepec 1990-2010.....	68

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación del Municipio de San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca.	22
Figura 2. Estrechamiento lineal de la banda 4 Landsat ETM+ a) banda original (6-154), b) estrechada en forma lineal (0-255).	33
Figura 3. Composiciones de color. a) Landsat TM 1990, b) Landsat ETM+ 2000, c) Spot HRG 2010.....	35
Figura 4. Firmas espectrales de los usos del suelo y coberturas forestales en cada clasificación de las imágenes.....	50
Figura 5. Mapa de uso del suelo y cobertura forestal del área de estudio para el año 1990.	55
Figura 6. Mapa de uso del suelo y cobertura forestal del área de estudio para el año 2000.	56
Figura 7. Mapa de uso del suelo y cobertura forestal del área de estudio para el año 2010.	57

Resumen

El presente estudio consistió en la generación de cartografía del uso de suelo y cobertura forestal del Municipio de San Pedro Mixtepec, Oaxaca y en el cálculo de su tasa de cambio, en un período de 20 años, utilizando imágenes de los satélites Landsat (TM 1990 y ETM+ 2000), así como Spot (HRG 2010).

Se realizó una clasificación supervisada, empleando el clasificador denominado MAXLIKE (máxima verosimilitud). Se identificaron nueve categorías de cobertura forestal y uso del suelo: bosque de encino, selva mediana subperennifolia, selva baja caducifolia, manglar, pastizal, zonas agrícolas, cuerpos de agua, áreas urbanas y áreas sin vegetación aparente. La validación se realizó mediante puntos de referencia obtenidos de los Inventarios Nacionales Forestales (1994 y 2000) y trabajo en campo del año 2010. De acuerdo al índice de Kappa (1990, 2000 y 2010), la elaboración de las cartas de uso del suelo obtenidas, tuvieron una exactitud del 78%, 82% y 82.3%, respectivamente.

Se calculó una tasa de cambio total de -1.05% y una pérdida anual de superficie forestal de 220 ha. El bosque de encino presentó la tasa de cambio más alta -5.59% (-126 ha). Le sigue la selva baja caducifolia con la tasa de -1.05%, con una pérdida de 3,742.7 ha. De los usos de suelo, resaltan las zonas agrícolas con una disminución de 2,134.5 ha, lo que representa una tasa de -3.53%. Lo anterior arroja un índice muy bajo de recuperación de las coberturas forestales, ya que los pastizales alcanzaron una tasa de 4.96% y un incremento de 5,974 ha. Durante el estudio solo el 47.1% (167,942 ha) del municipio permaneció sin cambio alguno y las transiciones de las coberturas forestales se dieron principalmente hacia las actividades agropecuarias (ganadería y agricultura).

Palabras claves: Uso de suelo, sistema de información geográfica (SIG), clasificación supervisada, tasa de cambio, transición de clases.

Abstract

The current study created a land-use and land-cover cartography map of the municipality of San Pedro Mixtepec, Oaxaca, and a calculated of the change rate, in a 20-year period (1990-2010), utilizing Landsat satellite images (TM 1990 and ETM+ 2000(and Spot (HRG 2010).

A supervised classification was generated, through the Maxlike (Maximum Likelihood algorithm. Nine types of land use and land cover were identified: forest oak, tropical evergreen forest, tropical deciduous forest, mangrove, grass, agriculture zone, water, areas urban and areas without apparent vegetation. The accuracy assessment was made through points of reference of the Forest National Inventory (1994 and 2000) and field work for 2010. Of agreement to the Kappa coefficient (1990, 2000 and 2010), the maps land use were produced with overall accuracies between 78%, 82% and 82.3%, respectively.

The estimated annual change rate was -1.05% and an annual loss of land cover of 220 hectares. The forest oak presented the highest change rate of -5.59% (loss 126 hectares). Next was the tropical deciduous forest with a rate of -1.05%, with a loss of 3,742.7 hectares. The agriculture zone stands out with a loss of 2,134.5 hectares, representing a rate of -3.53%. This wasn't enough for land cover recovery, since grass cover had a rate of 4.96% and increment of 5,974 hectares. During this period alone 47% (167,942 hectares) of the municipality remained without change and land cover transitioned to grass and agriculture zone.

Key words: land use, geographical information system, supervised classification, change rate, classes transition.

I. Introducción

México se encuentra dentro de los países con mayor riqueza biológica a nivel mundial (CONABIO 2000); sin embargo, los procesos de cambio de uso de suelo y cobertura se acentúan de manera alarmante en las áreas con mayor biodiversidad (bosques tropicales), lo que genera el detrimento de la flora, fauna y servicios ambientales (Velázquez *et al.* 2003). Así como una acelerada deforestación y conversión de su vegetación nativa a usos humanos (Velázquez *et al.* 2002).

De acuerdo con Cortina (*et al.* 1999) en las zonas tropicales el proceso de cambio es complejo debido a la rápida incorporación de tierras a las coberturas vegetales por el proceso de la sucesión de la vegetación, sobre todo en áreas donde se practica la agricultura de roza, tumba y quema. La FAO (2001), ha señalado una tasa de cambio de -1.1% para los bosques de México en el período 1990-2000, debido a la frágil naturaleza de sus suelos y escasa capacidad de recuperación (Sánchez & Rebollar 1999).

El uso de la tierra para proveer bienes y servicios representa la principal alteración humana (Vitousek *et al.* 1997). Los impactos derivados por el cambio de uso del suelo generalmente se relacionan con la deforestación y fragmentación de los ecosistemas, la desertificación, y el cambio climático (Fearnside 2001), así como la reducción de los servicios ambientales (Lambin *et al.* 2001).

En México, conocer la magnitud, dinámica y causalidad de los procesos de cambio de cobertura y uso del suelo es una tarea prioritaria por las consecuencias que están generando (Bocco *et al.* 2001). Cada localidad, región y país debe tener bien definidas las causas de esta perturbación a fin de planear con objetividad el uso y manejo del territorio.

Actualmente existen diversas metodologías basadas en sensores remotos tales como: fotografías aéreas e imágenes de satélite o cartografía temática de cobertura y los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.), que sirven de apoyo a la determinación de los diferentes tipos de vegetación que poseen algunas regiones de nuestro país y que permiten entender la complejidad de los ecosistemas, así como conocer fuentes de información y el costo de las mismas.

Oaxaca es el estado más rico en cuanto a biodiversidad se refiere, ya que concentra aproximadamente el 40% de la flora nacional (12,974 especies), y un porcentaje de endemismo del 8.3%. En lo referente a la fauna alberga un total de 4,543 especies (García-Mendoza *et al.* 2004). Sin embargo, es un estado con un alto grado de marginación social y con problemas ambientales como la deforestación (Velázquez *et al.* 2003), debido principalmente al avance desmedido de la agricultura.

Es importante señalar que la mayoría de los estudios relacionados al cambio de uso del suelo se realizan a escalas menores ($\geq 1:250,000$), lo que indica resultados muy generales. Por ello el presente trabajo abarca la microcuenca de San Pedro Mixtepec, a fin de obtener resultados más confiables que sirvan de apoyo a posteriores trabajos de ordenamiento territorial, con las implicaciones ecológicas y socioeconómicas que conlleva para la región. Además de que existen pocos estudios de este tipo en la región.

Por lo anterior, realizar un estudio de cambio de uso del suelo en el Municipio de San Pedro Mixtepec se justifica ya que en términos globales, regionales y locales, la degradación de la cubierta vegetal para dar paso a actividades tecnógenas como la agricultura y la ganadería, están ocasionando transformaciones en los ecosistemas a un paso acelerado. Sin embargo, el conocimiento para estimar el impacto de estos cambios

en los sistemas naturales y humanos es aun fragmentario (López *et al.* 2001). La presente investigación pretende identificar y cuantificar los tipos de uso de suelo y cobertura forestal que existieron en 1990, 2000 y 2010, los dos primeros años con base en inventarios forestales (1994 y 2000) y el último sustentado en estudios de campo, para conocer la velocidad de los cambios y como se da la transferencia entre clases en el tiempo, lo cual compromete y agrava la disponibilidad de los recursos forestales, hídricos y suelos productivos en el Municipio.

II. Objetivos

2.1. Objetivo general

- Determinar los cambios del uso de suelo y cobertura forestal en un período de dos décadas en el Municipio de San Pedro Mixtepec, Oaxaca, a fin de evaluar la dinámica de los mismos.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar y cuantificar los usos del suelo y las coberturas forestales en 1990, 2000 y 2010, en el Municipio de San Pedro Mixtepec, Oaxaca.
- Determinar la tasa de cambio de las coberturas forestales entre 1990-2000, 2000-2010 y 1990-2010.
- Calcular la transferencia de clases entre 1990-2010.
- Contribuir en el estudio y conocimiento de los usos y tendencias de cambios del suelo en la Costa de Oaxaca.

III. Hipótesis

En el Municipio de San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca, la dinámica de uso y cobertura del suelo se presenta con una tendencia general de un cambio de uso forestal hacia uno agrícola.

IV. Revisión de Literatura

4.1. Cambio de uso del suelo

El uso del suelo se caracteriza por el arreglo, actividad y producción que realizan las personas en un cierto tipo de cobertura vegetal para producir, cambiar o mantener esta cobertura del suelo (Reyes *et al.* 2006).

Los estudios sobre el cambio de cobertura y uso del suelo proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una cierta región (Lambin *et al.* 2001). Estudiar el impacto que ocasiona el cambio de cobertura y uso del suelo, es condición necesaria para entender los factores ambientales y socioeconómicos que afectan su uso, ya que estos factores varían de una región a otra.

En la región sur de México, la población es en mayor medida campesina (Ávila 2008), por ello la principal actividad productiva es la agricultura; además se tiene muy arraigada la práctica agrícola de la roza, tumba y quema, tanto a nivel estatal como en la región costa de Oaxaca (Rodarte 1997). Esta técnica presenta deficiencias de uso y manejo de suelos y vegetación. Hoy día los datos cuantitativos de cada uso del suelo en cuencas o microcuencas son aún incompletos e inexactos (Lambin 1997). Por tal motivo, los estudios sobre el tema son de fundamental importancia en áreas pequeñas, pues esto

permite la obtención de resultados más concretos para la planeación y la toma de decisiones.

Anteriormente, el análisis de los usos y coberturas vegetales del suelo se realizaban mediante procedimientos de encuestas o muestreos (censos agrarios e inventarios forestales). A partir del Inventario Nacional Forestal de 1991 los cambios de uso del suelo fueron evaluados a base de imágenes de satélite y técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilitando así la visualización y el análisis con la finalidad de mostrar los cambios de uso en el tiempo de una manera más eficiente y menos costosa (Peña *et al.* 2005).

Los inventarios nacionales forestales son la fuente de información oficial que nos permite ver el tipo de uso de suelo que tiene mayor y menor presencia. A la fecha se han realizado cuatro inventarios nacionales: el primero de 1961 a 1985 utilizó fotografías aéreas de las zonas arboladas principales y muestreos de campo. Las áreas arboladas de menor valor, así como las no arboladas, se estudiaron con reconocimientos aéreos e imágenes de satélite escala 1:3,000,000.

En 1991 se actualizó el primer inventario utilizando la información de éste y los inventarios que se formulan para estudios dasonómicos y planes de manejo integral. Este segundo inventario se conoció como Inventario Nacional Forestal de Gran Visión, las áreas forestales se plasmaron en mapas a escala 1:1,000,000; en su elaboración se emplearon imágenes de satélite de alta y baja resolución, así como la cartografía existente.

Para detallar el segundo inventario y actualizarlo, en 1992 inició el inventario conocido como Inventario Nacional Forestal Periódico, cuyo reporte fue publicado en 1994; se substanció con imágenes Landsat TM para elaborar el mapa de todo el territorio nacional

en escala 1:250,000, levantamientos en campo mediante parcelas de muestreo distribuidas sistemáticamente, obtención de mapas en los cuales se zonificaron los terrenos forestales según su aptitud y funciones, así como el almacenamiento de toda la información en archivos magnéticos para su uso posterior en Sistemas de Información Geográfica.

En el año 2000, la UNAM actualizó la cartografía de uso del suelo y vegetación Serie II escala 1:250,000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) con base en imágenes de satélite Landsat (ETM+) registradas entre noviembre de 1999 y mayo de 2000 (SEMARNAT 2010).

Estos inventarios han sido muy útiles, ya que nos proporcionan una cuantificación y distribución de los usos de suelo y las coberturas a nivel nacional. La Tabla I muestra las superficies a nivel nacional de las coberturas y usos del suelo identificados en el municipio de San Pedro Mixtepec. Se observa que la cobertura con mayor presencia es la selva baja caducifolia. Por la limitada distribución, el manglar ocupa la superficie más pequeña. Con respecto a los usos del suelo se observa que la agricultura (temporal, riego y humedad) tiene un gran impacto ya que cubre una superficie de 45,664,378 ha, seguido por los pastizales. Estas dos últimas clases son las más dinámicas.

Los estudios de cambio de uso de suelo se han concentrado en las regiones templadas y el trópico húmedo. En su mayoría no incluyen un análisis de los factores causantes ni de los cambios espacio-temporales que se provocan con los cambios de uso de suelo. Lo que ayuda a proponer alternativas que contrarresten el efecto degradatorio (Bocco *et al.* 2001).

Tabla I. Superficies a nivel nacional de los tipos de vegetación y usos de suelo en el Municipio de San Pedro Mixtepec, tomados del INF 2000-2001 y la SEMARNAT.

Tipos de vegetación y usos del suelo	Superficie (Ha)
² Bosque de encino	11,096,796
² Selva mediana subperennifolia	5,428,485
² Selva baja caducifolia	14,460,224
² Manglar	882,032
² Pastizal	12,362,500
¹ Agricultura (riego y humedad)	22,824,668
¹ Agricultura (temporal)	22,839,710
¹ Cuerpos de agua	1,099,645
¹ Áreas urbanas	1,246,813
Áreas sin vegetación aparente	988,752

Fuente: ¹Palacio-Prieto *et al.* (2000), ²SEMARNAT (2010).

4.2. Causas y consecuencias generales del cambio de uso del suelo a diferentes escalas

El cambio de uso del suelo se ha convertido en una importante causa del cambio climático local, regional y global (Dupuy *et al.* 2007) y afecta con intensidad, la capacidad de los sistemas biológicos para soportar y satisfacer las necesidades humanas (Vituosek *et al.* 1997).

En México, como en muchos países tropicales, se dan importantes procesos de cambio de la cobertura vegetal del suelo, especialmente por la deforestación para el establecimiento de zonas agrícolas, ganaderas y urbanas (Mas *et al.* 2009). Esto ha ocasionado el 36% de las emisiones de carbono de efecto invernadero que producen plagioclimas, aridización, desertificación, fragmentación de bosques, el surgimiento de plagas y enfermedades, erosión y contaminación de suelos (Cairns *et al.* 2000, Franco *et al.* 2006). Lo anterior disminuye el potencial productivo del suelo, la pérdida de poblaciones de fauna y la conversión de ecosistemas forestales a vegetación secundaria,

en lo que coinciden Hernández *et al.* (2000), Velásquez *et al.* (2002) y González *et al.* (2009).

En efecto, la fragmentación de los ecosistemas aumenta el riesgo de extinción local de las especies típicas de plantas y animales (Williams *et al.* 2002). Por su parte el incremento de la densidad poblacional humana implica una mayor ocupación de la superficie y reducción de los ecosistemas forestales, para permitir el desarrollo de las diferentes actividades (Carnevale *et al.* 2007).

Los cambios de cobertura y uso del suelo se relacionan con la deforestación y fragmentación de ecosistemas, la desertificación, la alteración del ciclo hidrológico e incremento de la vulnerabilidad de grupos humanos (Reyes *et al.* 2006), intensificación de las sequías, deterioro y degradación de suelos, cambios en el microclima y alteraciones en los regímenes de temperatura y precipitación, favoreciendo con ello el calentamiento global y la disminución en el secuestro de bióxido de carbono, pérdida de hábitats y de biodiversidad (Nájera *et al.* 2010).

El avance de la frontera agrícola hacia superficies forestales ha traído como consecuencia la ruptura del frágil equilibrio suelo-vegetación y con ello una alta susceptibilidad de los suelos a los procesos erosivos, y por ende, a su bajo potencial productivo (Orozco *et al.* 2004 *In:* Jaimes *et al.* 2008). La contaminación del suelo, agua y aire a través de agroquímicos tiene un efecto negativo en la naturaleza. Más de 80% de los suelos agrícolas de México presenta algún grado de erosión, debido a los monocultivos y la deforestación, promovida esta última por la apertura de tierras para la ganadería extensiva y la producción de pasturas (Greenpeace 2009).

Los efectos del proceso de urbanización en zonas forestales son: 1) sedimentación aguas abajo, 2) inundaciones, 3) erosión del suelo, 4) disminución de la calidad del agua (García *et al.* 2002, Berlanga-Robles & Ruiz-Luna 2007). En consecuencia el crecimiento urbano ejerce una enorme presión sobre el territorio y sus recursos naturales (López & Plata 2008).

La degradación del hábitat, implica un cambio en la utilización del terreno y es un problema grave en los trópicos, ya que su uso forestal, su composición y funciones biológicas quedan comprometidas por la intervención humana (Cayuela 2006).

La falta de auténticas políticas enfocadas al desarrollo rural forestal, de ordenamiento territorial y la presión sobre los recursos forestales por parte de las comunidades que se encuentran en condiciones de pobreza y marginación social. La sustitución de coberturas forestales por otros usos a fin de producir alimentos principalmente (Challenger *et al.* 2009).

Las prácticas y métodos inadecuados en el aprovechamiento de los recursos naturales, además el desconocimiento del impacto negativo que se produce en los ecosistemas, ha generado la disminución de los mismos. Ejemplo de lo anterior es la expansión urbana, del sector turístico y de la construcción de infraestructuras para servicios a la sociedad (Peña *et al.* 2005, Reyes *et al.* 2006).

4.3. Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.)

Gracias a los avances tecnológicos, se han desarrollado diferentes herramientas para facilitar el estudio de los recursos naturales. Es el caso de las técnicas de percepción remota (imágenes de satélite) y los SIG (mecanismos para su análisis) aplicados y

reconocidos como herramientas poderosas y efectivas para detectar los cambios de uso y cobertura del suelo (Rosete & Bocco 2003).

La percepción remota es una técnica que permite elaborar levantamientos de altos volúmenes de información de la superficie terrestre que sirve de apoyo a diversas ciencias y ocupa un lugar de notable aplicación en las actividades agrícolas, medioambientales, catastrales, militares, industriales y de ordenamiento territorial; lo cual subraya su importancia, ya que es un apoyo muy conveniente en reducir los costos y el tiempo invertido para la elaboración de un proyecto o estudio (CONAGUA 2005).

La percepción remota se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia sobre la superficie terrestre, basándose en las propiedades de radiación electromagnética y su interacción con los materiales existentes. Su objetivo principal es la identificación de los elementos de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella ocurren, a través de las firmas espectrales de cada elemento presente en la superficie de interés (Sacristán 2006).

Un sistema de percepción remota requiere al menos, de tres componentes: foco energético, superficie terrestre y sensor. Se entiende como imagen de percepción remota a los datos obtenidos por procedimientos fotográficos o de detección óptico-electrónica, con lo que es posible presentar una expresión fiel de la realidad, esto se aplica tanto a datos captados por satélites, mecanismos aerotransportados y radar (Rivera 2007).

La información obtenida mediante percepción remota es procesada y analizada mediante los SIG, definidos como un conjunto de programas y equipo de computación que permiten el acopio, manipulación y transformación de datos espaciales (mapas, imágenes de satélite) y no espaciales (atributos) provenientes de varias fuentes, temporal y espacialmente diferentes (Bocco *et al.* 1991 *In:* Rosete & Bocco 2003). Están integrados

por cuatro elementos: entrada de información, gestión de datos, transformación y análisis de datos y la salida de la información (Gómez & Barredo 2005).

La ventaja que presentan en comparación con otros sistemas no digitales es la gran capacidad de almacenamiento de datos, además el investigador solo puede analizar los datos que de acuerdo a su criterio y método empleado le ayuden a generar la información más correcta y útil (Moreira 1996). Un SIG contiene la información en formato digital del terreno en capas o niveles, de tal manera que componen la realidad en distintos temas de acuerdo al interés del usuario, por ejemplo, uso del suelo, hidrología, vías de comunicación, curvas de nivel, etcétera (Arancibia 2008). Además se puede modificar el tamaño de los pixeles, permitiendo con esto generar resultados del área de estudio en distintas escalas y tener compatibilidad de la información en diferentes programas (Camara *et al.* 1996 *In*: Moizo 2004).

4.4. Satélites Landsat y Spot

De acuerdo con la National Aeronautics and Space Administration (NASA), el 23 de julio de 1972 se lanzó el primer satélite de la serie ERTS (Earth Resource Technology Satellite). Posteriormente fue rebautizada como Landsat a partir del segundo lanzamiento en 1975 (Landsat 2). El objetivo principal de estos satélites fue el estudio de los recursos naturales (deforestación, crecimiento urbano etc.); a la fecha se han lanzado 7 satélites al espacio (sacristán 2006) (Anexo 1). Los sensores han sido: RBV (Return Beam Vidicom), MSS (Multi Spectral Scanner), TM (Thematic Mapper), ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) (<http://www.esri-chile.com/biblioteca/landsat7etm.pdf>). El satélite Landsat 6 cargado con el sensor ETM, al momento del lanzamiento en 1993 sufrió un problema y no entro en órbita, por ello no funcionó correctamente. En la actualidad solo funcionan los satélites Landsat 5 TM (1-03-1984) y Landsat 7 ETM+ (15-04-1999). Las características de este

último sensor son las siguientes: sigue una órbita heliosincrónica a 98.2 grados de inclinación con respecto al ecuador, gira a una altura de 705 km, el campo de captura de la imagen es de 185 km y su resolución temporal es de 16 días.

En cuanto al satélite Spot (Système Pour L'Observation de la Terre) de origen francés, ha lanzado hasta la fecha 5 satélites, a partir del 22 de febrero de 1986 con el lanzamiento espacial del satélite SPOT 1 (HRV). Los sensores han sido: HRV (High Resolution Visible) para SPOT 1, 2 y 3; HRVI (High Resolution Visible Infrared) SPOT 4 y HRG (High Resolution Geometric) para SPOT 5 (SPOT IMAGE www.spotimage.com/web/es/253--imagen-satelite-spot-formosat-2-kompsat-2-radar.php) (Anexo 2). Este último fue lanzado el 4 de mayo de 2002 y presenta las características siguientes: sigue una órbita heliosincrónica a 98 grados de inclinación con respecto al ecuador, gira a una altura de 832 km, el campo de captura de la imagen es de 2, 250 km y su resolución temporal es de 26 días.

Los satélites producen imágenes, las cuales se definen como un arreglo matricial de hileras y columnas de píxeles (elementos de la imagen). Cada píxel está asociado a un número digital (ND), estos niveles van de 0 a 255, y son indicadores de la intensidad de la energía electromagnética reflejada por la superficie terrestre (Coronado 2001). En la actualidad una de las grandes ventajas de las imágenes satelitales es que, dado su formato, permite su manipulación en computadoras, esto globalmente se conoce como Sistemas de Información Geográfica (SIG). El objetivo central es generar información válida para la toma de decisiones (Rosete & Bocco 2003).

4.5. Aplicación de los sensores remotos y SIG en los estudios de cambio de uso del suelo y coberturas forestales

López *et al.* (2001), efectuaron un estudio en la ciudad de Morelia, Michoacán en un área de 187.5 km², con el fin de predecir el cambio de uso del suelo y cobertura. La metodología aplicada fue la comparación y análisis de 71 fotos aéreas pancromáticas con una escala aproximada de 1:25,000 (1960), 1:50,000 (1975) y 1:25,000 (1990). También se utilizaron imágenes de satélite Landsat TM, con una resolución 30x30 m de septiembre de 1997. En el análisis de la información espacial se utilizaron los software's ILWIS versiones 1.41 y 2.1. En la predicción se emplearon las cadenas de Markov. El resultado fue que el cambio de uso del suelo más importante en esa área de estudio fue el incremento de la superficie de la ciudad de Morelia, la cual creció 600% entre 1960 y 1990, ocasionando la reducción de los distintos tipos cultivos. La predicción señala que los usos del suelo con mayor presencia fueron: el crecimiento urbano, las plantaciones y los cultivos, los más dinámicos fueron los pastizales y matorrales.

Bocco *et al.* (2001), elaboraron un estudio sobre la dinámica del cambio de uso del suelo en Michoacán con el objetivo de contribuir a mejorar la comprensión de los procesos de cambio y uso del suelo en el tiempo y a nivel regional. Al efecto utilizaron imágenes de satélite Landsat TM impresas de 1993, mapas topográficos y geológicos a escala 1:50,000 y la cartografía de cobertura del terreno. La digitalización y edición de la interpretación se realizó en el programa ILWIS (Integrated Land and Water Information System). Los resultados obtenidos indicaron que en un período de 18 años Michoacán ha alcanzado una tasa de deforestación de 1.8% en los bosques templados y del 1% para las selvas. La causa principal fue el descontrol de la actividad forestal y no el aumento poblacional como fue planteado en sus hipótesis.

García *et al.* (2002), realizaron un estudio sobre los cambios de uso agrícola, en un área de 3, 049, 100 ha en el estado de Guanajuato. La información del uso anterior del suelo se basó en la digitalización de la cartografía de uso del suelo a escala 1:50,000. Los usos del suelo del área se obtuvieron a través de imágenes de satélite Landsat de 1976 y 1977, cartografía escala 1:50,000, ortofoto digital y levantamientos en campo con GPS. Los programas empleados fueron ERDAS Imagine V. 5.3 NT, Arc/Info V.7.1 NT, IDRISI WV.2.0 y ArcView V. 3.0. El resultado fue una disminución de 57,051 ha (4%) en toda el área agrícola del estado de Guanajuato durante un período de 27 años aproximadamente, sin embargo, se observó un aumento de la zona urbana e industrial.

Rincón (2003), llevó a cabo un estudio en la región de la Sierra Sur de Oaxaca con información de 1974 al 2000, el objetivo fue analizar el cambio de uso del suelo y la deforestación de dos áreas: una bajo manejo forestal y la otra sin manejo. Como resultado obtuvo que en el área sin manejo forestal existen mayores cambios en el uso del suelo y una tasa de deforestación de 2.17% mientras que en el área bajo manejo forestal se obtuvo una tasa de deforestación de 0.33%. Lo anterior debido al incremento de la agricultura en ambas áreas.

Velázquez *et al.* (2003), realizaron un estudio de cambio de uso-cobertura del suelo en todo el estado de Oaxaca, con cartografía de uso del suelo de 1980 e imágenes Landsat ETM+ tomadas entre noviembre de 1999 y abril de 2000. El software empleado fue Arc/Info (8.1 versión). El resultado indica que Oaxaca ha perdido más de medio millón de ha de bosques en 20 años.

García *et al.* (2005), llevaron a cabo un estudio sobre la dinámica del uso del suelo en tres ejidos cercanos a Chetumal, Quintana Roo, con los siguientes objetivos: a) cuantificar

la dinámica en los cambios de uso de suelo y cobertura vegetal (1990-2000); b) realizar una proyección a futuro con las cadenas de Markov y c) a través de entrevistas y archivos del Registro Agrario Nacional explorar las causas inmediatas y subyacentes del cambio de uso de suelo. Además de las imágenes Landsat ETM, se utilizó la cartografía a escala 1:50,000. La clasificación fue supervisada con el programa IDRISI 32, las clases obtenidas fueron seis. Como resultado se encontró una cantidad importante de vegetación secundaria mayor a 5 años, como consecuencia de los Programas Nacionales de Desmonte. Estas ya no se cultivaron en los últimos años, lo que provocó una recuperación de 0.6% de la selva, rebasando así la transformación de la misma para actividades agropecuarias.

Reyes *et al.* (2006), realizaron en San Luís Potosí, México, un estudio de cambio de uso del suelo sobre la elaboración de un proyecto de riego, para ello emplearon imágenes de satélite Landsat MSS de 1973, 1985 y 1990, además una imagen ETM+ del 2000, Para el proceso digital y clasificación de las imágenes se utilizó el programa IDRISI 32.2 y las bandas 2, 3 y 4 de las imágenes MSS, además de la banda 5 y 7 en el caso de la imagen ETM+. Como resultado se obtuvo que solo durante la etapa inicial del proyecto (1973-1985) fueron desmontadas más de 73,000 ha de selva baja espinosa, selva baja caducifolia y selva mediana subperennifolia. Para el período 1973-2000 la tasa de deforestación fue del 11% anual.

Franco *et al.* (2006), realizaron un estudio con el objetivo de identificar la dinámica del cambio de uso del suelo en el Parque Nacional Nevado de Toluca en el estado de México, para determinar el grado de perturbación o recuperación forestal con base en la densidad del arbolado en el período de 1972-2000, empleando cartografía y fotografías aéreas, además del programa IDRISI Kilimanjaro. La extensión del parque es aproximadamente

540 km². Se digitalizaron las cartas de uso del suelo y vegetación a escala 1:50,000 existentes para el parque. El trabajo en campo consistió en el registro de la categoría de uso del suelo y sus coordenadas UTM con un navegador GPS, para evaluar la precisión de la identificación elaboraron una matriz de confusión. Por último se calculó la tasa de deforestación para los años de 1972 y 2000 con la fórmula utilizada por Rosete *et al.* (1997). Los resultados muestran que a pesar de ser un área que de cierta manera está protegida, la tasa general de deforestación es de 0.31% equivalente a 150 ha.año⁻¹ de bosques.

Peña-Cortés *et al.* (2006), llevaron a cabo un estudio en la cuenca costera del Lago Budi, Chile, con el objetivo de analizar los patrones y procesos ecológicos en esa cuenca y evaluar su utilidad como insumo para la planificación ecológica del área y la conservación de sus humedales. Se emplearon fotografías aéreas escala 1:60,000 para el año 1980 y 1:20,000 para los años de 1994 y 2004. El procesamiento se realizó con el módulo Orthoengine de PCI GeomaticsTM v8.2, con un modelo Thin Plate Spline y tomando como referencia una imagen Landsat 7 ETM+ (ortoimagen) de 2003. Se observó un aumento significativo en la superficie de humedales ribereños, una disminución de la superficie del espejo de agua y un aumento de las plantaciones forestales hasta alcanzar una tasa de 27.2%.

Dupuy *et al.* (2007), realizaron un análisis de los cambios en la cobertura vegetal y los usos del suelo en Quintana Roo, con los siguientes objetivos: a) analizar los cambios de cubierta y uso del suelo en el período de 1979-2000; b) interpretar dichos cambios a la luz de factores ecológicos, geográficos, socioeconómicos e institucionales y c) discutir las posibles tendencias de los cambios de cobertura y uso del suelo futuros en función de las actuales actividades productivas, políticas institucionales y tendencias climáticas. El área

de estudio abarcó una superficie de 27,822 ha. El material utilizado fueron fotografías aéreas de 1979 y 2000 con una escala de 1:75,000 en tonos de gris. Adicionalmente se utilizaron imágenes de satélite Landsat (MSS) de 1976 y (TM) de 2000 sólo como apoyo para la fotointerpretación. Y de manera contraria a lo que normalmente se espera (cambios negativos), se registró un aumento en la cobertura vegetal de las selvas provenientes en su mayoría de áreas quemadas, de 10,832 ha en 1972 a 22,167 ha para el año 2000.

Duran *et al.* (2007), efectuaron un estudio, el cual consistió en un diagnóstico del grado de deforestación, a nivel estado y local en la cuenca del Río Copalita, Oaxaca. Para el análisis de los cambios de cobertura de vegetación y usos del suelo en un período de 20 años (1980-2000), utilizaron el software Arc/Info 8.1. El resultado fue una tasa de deforestación estatal de -0.39% y para la región de Copalita la tasa fue de -0.69%, para ambos la mayor parte de los bosques y selvas deforestadas fueron convertidas a usos agrícolas, principalmente agricultura de temporal y en menor medida a pastizales.

Díaz-Gallegos *et al.* (2008), realizaron el monitoreo de la deforestación en el Corredor Biológico Mesoamericano, porción mexicana (CBM-M). Empleando las bases cartográficas de INEGI y el Inventario Nacional Forestal del 2000, ambos en escala 1:250,000. El proceso de cambio se obtuvo mediante la sobreposición de la información antes mencionada, a través del software Arc/Info 7.1. La pérdida forestal estimada en el CBM-M fue de 1,000,000 ha en 22 años, con una tasa de deforestación de -0.7% donde los pastizales presentaron el 70% de los cambios.

Miranda-Aragón *et al.* (2009), se plantearon como objetivos, analizar la dinámica del cambio de uso del suelo en Tlalchapa, Guerrero, durante el período 1973-2006 mediante

la comparación de mapas temáticos generados con imágenes de satélite, y modelar empíricamente el proceso de lluvia-escorrentamiento del Río grande. Para lo cual utilizaron imágenes satelitales Landsat MSS 1973 y QuickBird 2006. La clasificación de las imágenes se realizó con el software ERDAS Imagine 8.7 con el clasificador denominado máxima verosimilitud. El resultado fue una tasa de cambio para el período 1973-2006 de -3.38%.

Nájera *et al.* (2010), analizaron los cambios de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río mololoa, Nayarit, entre 1995 y 2005, a partir de la interpretación de ortofotos digitales y manejo de la información en un SIG. El resultado muestra que el paisaje de la cuenca está dominado en 83.01% por la vegetación natural y tierras de cultivo. La dinámica de cambio está concentrada en los tipos de cobertura “vegetación nativa” y “construcciones”, la primera disminuye a una tasa de 41.67 ha/año, y la segunda, aumenta 74.86 ha/año. La tasa de deforestación de los bosques y selvas de la región fue de 0.1 y 0.36%.

Ramos & Rodríguez (2010), analizaron los cambios de usos del suelo y cobertura vegetal en el Municipio de Comalcalco, Tabasco, México, en el período 2000-2010. Emplearon imágenes Landsat 2000, Spot 2009 y verificaciones en campo. Los programas utilizados fueron ArcView 3.2, ArcGIS 9.2, ERDAS Imagine, gvSIG y Quantum GIS. Como resultado se obtuvo que los pastizales son las de mayor importancia (36,595 ha), seguido de la agricultura con 23,622 ha.

Hernández *et al.* (2011), analizaron la deforestación y el deterioro de las selvas en la Región Uxpanapa, Veracruz. El objetivo fue determinar de los tipos de uso de suelo y los cambios suscitados de 1972 a 2009. Elaboraron datos temporales de la cobertura vegetal

y uso del suelo mediante imágenes Spot 5 (2009), Landsat ETM+ (2000 y 2010), Landsat TM (1990) y Landsat MSS (1972). Para la clasificación de las coberturas y usos del suelo más actual (2009) se unieron las imágenes Spot 2009 y Landsat 2010. Estas imágenes fueron clasificadas mediante el método de clasificación supervisada, con el software ArcGIS 9.2 (ESRI). Además se realizaron recorridos en campo para el año 2010, posteriormente se calculó la tasa de cambio para los años 1972, 1990, 2000 y 2009. La tasa de deforestación anual de las selvas fue de 2.1%, siendo las áreas más afectadas las de las partes planas, cerca de ríos y próximas a las carreteras y caminos.

Figuroa-Jáuregui *et al.* (2011), realizaron un estudio en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. El objetivo principal fue analizar el cambio de uso de suelo mediante comparación de mapas creados con imágenes de satélite Landsat MSS de 1975, Landsat TM de 1993 y 2000, y Spot 2009. La clasificación supervisada de las imágenes se hizo con el software Idrisi Andes, con el procedimiento de máxima verosimilitud. La tasa anual de deforestación calculada fue de -0.19% desde 1975 hasta 2009.

V. Materiales

5.1. Área de estudio

5.1.1. Localización

El estudio se llevó a cabo en el Municipio de San Pedro Mixtepec, el cual se localiza en la región costa del estado de Oaxaca, México (Fig. 1), a una altura promedio de 220 msnm, entre las coordenadas 15°51'36" a 16°1'48" latitud norte y 97°4'12" a 97°12'36" longitud oeste. Limita al Norte con el Municipio de San Gabriel Mixtepec y San Sebastián Coatlán;

al Sur con el Océano Pacífico; al Este con Santa María Colotepec; al Oeste con Santos Reyes Nopala y San Pedro Tututepec. Cuenta con una extensión de 320.6 km² (INEGI 2003c).

5.1.2. Topografía y Orografía

De acuerdo con las cartas topográficas D14B16, D14B17, E14D86, E14D87, escala 1:50,000 (INEGI 2003a), en el área de estudio se encuentran formaciones con altitudes desde los 0 a 700 msnm. Pero la mayoría de estas oscilan entre 200 y 440 msnm, debido a que las topoformas predominantes son llanuras y en menor proporción están las sierras (INEGI 2002b). Las montañas que sobresalen son: cerro limón, cerro caballo, cerro el ocote, cerro las palmitas, cerro el zopilote, cerro la cebadilla, cerro la frutilla y el cerro de la vieja.

5.1.3. Edafología

De acuerdo a la clasificación de suelos de IUSS (2007), los tipos de suelo que predominan en el área de estudio son: 1) Regosol-éutrico: presentan un color pardo, con gris o amarillo. Las texturas varían de arena a migajón arcillo-arenoso. Estructura de forma migajosa de tamaño muy fino y desarrollo débil. El pH va de moderado a ligeramente ácido. Y la capacidad de intercambio catiónico fluctúa de baja a moderada; 2) Cambisol-crómico: son de color pardo oscuro a rojo y saturación de bases mayor de 50%. Tiene variaciones texturales desde arena hasta migajones arcillo-arenosos. El pH fluctúa de muy alcalino a ácido de acuerdo a la profundidad de los horizontes. La capacidad de intercambio catiónico varía de bajo a moderado; 3) Litosol: son suelos menores de 10 cm de profundidad. El color es pardo oscuro, pardo grisáceo oscuro y negro. Tienen variaciones de texturas de gruesa (arena migajosa, medias (migajón arenoso, franca,

migajón arcilloso) hasta finas (arcilla). El pH fluctúa entre 6.1-7.4. La capacidad de intercambio catiónico está entre baja y muy alta; 4) Feozem-haplico: sus colores son pardo grisáceo, gris o a veces negro y a mayor profundidad pardos con tonos amarillentos o rojizos. Las variaciones texturales son muy amplias, desde arena hasta arcilla, pero con predominio de los migajones arenosos. El pH fluctúa de ácido a muy ligeramente alcalino. La capacidad de intercambio catiónico va de baja a muy alta (INEGI 1989, INEGI 2004b); 5) Solonchak-gléyico: presentan alta concentración de sales y tienen en el subsuelo un horizonte en el que se estanca el agua (horizonte gléyico), es de color gris o azuloso que al exponerse al aire se mancha de color rojo. Las texturas que presenta varían de arena a migajón arcilloso, con colores gris rojizo oscuro. El pH es moderadamente alcalino con variaciones de 8.3 a 7.7. Y la capacidad de intercambio catiónico va de muy baja a moderada (INEGI 2002e, Sánchez-Bernal *et al.* 2012).

La vegetación es un recurso directamente relacionado con el suelo. Sin embargo, la destrucción de la vegetación, la ganadería extensiva, la agricultura de roza, tumba y quema y el aumento poblacional, provocan la degradación de los tipos de suelo antes descritos para el Municipio de San Pedro Mixtepec (INEGI 2004a, Torres 2004 *In: García-Mendoza et al.* 2004, IUSS 2007). Esta degradación se manifiesta por la erosión eólica e hídrica, la acidificación, la pérdida de materia orgánica, la salinización, la compactación, la contaminación agroquímica, etcétera (García *et al.* 2002, Alfaro 2004 *In: García-Mendoza et al.* 2004, Nájera *et al.* 2010).

5.1.4. Clima

Semiárido cálido BS1 (h´)w con lluvias en verano y cálido sub-húmedo (Aw₀) y (Aw₁) con lluvias en verano (INEGI 2002a). La precipitación varía de 800-1,000 mm y de 1,000-1,200 mm (INEGI 2002c). La temperatura varía de 22-26°C y de 26 a 30°C (INEGI 2002d).

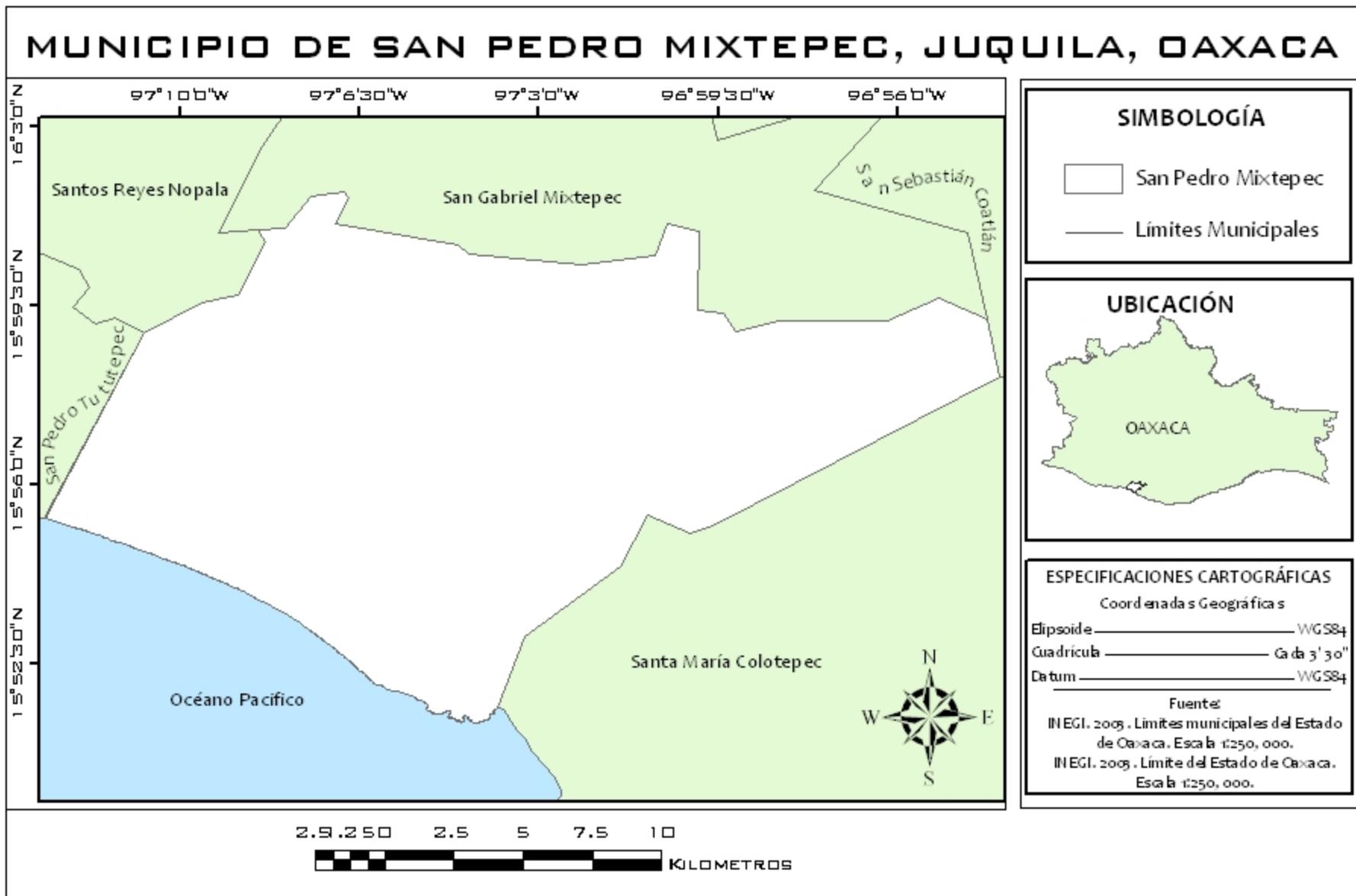


Figura 1. Mapa de ubicación del Municipio de San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca.

5.1.5. Hidrología

El Municipio se encuentra en la Región Hidrológica 21 denominada Costa de Oaxaca, y dentro de la cuenca Río Colotepec y otros (CONAGUA 1998). Los principales cauces son: el río San Pedro, el río rana (nacen en el Municipio de San Gabriel Mixtepec) y el río chiquito. Los arroyos sobresalientes son: “el zanate”, “la cañada”, “la yerba santa”, “el regadío”, “el salitre”, “toledo” y “arroyo tepehuaje”. El único cuerpo de agua es la laguna de Manialtepec, aproximadamente la mitad de esta pertenece al Municipio de San Pedro Mixtepec y el resto al Municipio de San Pedro Tututepec (INEGI 2003a).

5.1.6. Usos del suelo y cobertura forestal

Los principales usos del suelo y coberturas forestales en el Municipio de San Pedro Mixtepec de acuerdo con Palacio-Prieto *et al.* (2000) y descritos por el INEGI (1990) y Rzedowski (2006) son:

Bosque de Encino. Comunidad vegetal formada por diferentes especies de encinos o robles del género *Quercus*, en la región generalmente se encuentran en la zona transicional entre los bosques de coníferas y las selvas, alcanzan alturas de 4 a 30 m. Se desarrollan en diversas condiciones ecológicas que incluyen áreas cercanas al nivel del mar, pero usualmente se encuentran entre 1,600 y 2,900 msnm. En general se guardan complejas relaciones con los pinares, con los cuales comparten afinidades ecológicas generales, con el bosque mesófilo de montaña, diversos tipos de bosques tropicales, sabanas y otros tipos de pastizales, lo cual es explicable en función de su extensa amplitud ecológica. Por lo anterior se le puede encontrar formando una serie de mosaicos difíciles de cartografiar dependiendo de la escala a la que se trabaje. Este tipo de vegetación ocupa el 3.1% del total del municipio, se distribuyen al norte. De acuerdo con Pennington & Sarukhán (2005) las especies más importantes son: encino prieto (*Quercus*

oleoides), encino colorado (*Q. sororia*), encino memelita (*Q. glaucescens*), roble (*Q. peduncularis*), encino manzanillo (*Q. affinis*).

Por sus características, a escala local estos bosques han sido muy explotados con fines forestales para la extracción de madera, elaboración de carbón, postes y tablas para uso doméstico. Amplias extensiones de encinares se aprovechan con fines ganaderos (INEGI 2005).

Selva alta o mediana subperennifolia. En esta comunidad vegetal, menos de la mitad de los árboles tiran sus hojas en la época más seca del año, pero hay muchos componentes siempre verdes y otros que solo se defolian por un período corto, a veces de unas cuantas semanas. En consecuencia, esta comunidad presenta cierto verdor aun en las partes más secas del año. Los árboles tienen una altura media de 25 a 35 m. en este tipo de selva se distinguen tres estratos arbóreos, de 4 a 12 m, de 12 a 22 m y de 22 a 35 m. Se desarrolla en climas cálido-húmedo y subhúmedos, Aw para las porciones más secas, Am para las más húmedas y Cw en menor proporción. La temperatura que predomina es de 20 a 28 °C. La precipitación total anual va de 1,000 a 1,600 mm, se le puede encontrar entre los 0 a 1,300 msnm. La distribución de este tipo de vegetación es a menudo muy difícil de interpretar y cartografiar, debido a que con frecuencia forma mosaicos complejos en la selva baja caducifolia, con el palmar, con la sabana y otros tipos de vegetación. Tales mosaicos son particularmente frecuentes en sitios de terreno accidentado, donde las diferencias de exposición o localización topográfica determinan la presencia de uno o de otro tipo de bosque, de tal suerte que el área está llena de manchones discontinuos de dos o más formaciones vegetales. Ocupan el 20% del municipio y se distribuyen hacia el este y oeste. Las especies más importantes de acuerdo con Pennington & Sarukhán (2005) son: tzalam (*Lysiloma latisiliquum*), macuil

(*Tabebuia rosea*), ramón (*Brosimum alicastrum*), palo mulato (*Bursera simaruba*), chicozapote (*Manikara zapota*), crucillo (*Vitex gaumeri*), cacho de toro (*Bucida buceras*), tabaquillo (*Alseis yucatanensis*), cuil (*Inga jinicuil*), pelo de ángel (*Pseudobombax ellipticum*), caimito (*Chrysophyllum mexicanum*), tololote (*Andira inermis*), ceiba (*Ceiba pentandra*), mora (*Maclura tinctoria*). Este tipo de vegetación es muy importante por el alto costo de la madera tropical (Rzedowski 2006), desafortunadamente solo existen pequeñas áreas con vegetación de selva original (INEGI 2009).

Selva baja caducifolia. Se caracterizan por que más del 75% de los árboles tiran las hojas en la época seca del año, por lo general oscila alrededor de seis meses. La vegetación presenta una altura de 4 a 10 m. Se desarrolla en condiciones climáticas en donde predominan los tipos cálidos subhúmedos, semisecos o subsecos, el más común es el cálido subhúmedo (Aw), temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. La precipitación del mes más seco varía de 0 a 60 mm; lluvias en verano con índice P/T menor de 42.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2 % del total anual. Se encuentra en altitudes de 0 a 1,700 msnm. Esta cobertura ocupa el 70% y se distribuyen en el área central del municipio. Las especies presentes en este tipo de vegetación de acuerdo con Pennington & Sarukhán (2005) son: Palo mulato (*Bursera simaruba*), huaje (*Leucaena leucocephala*), colorín (*Eriythyna folkersii*), flor de mayo (*Plumeria rubra*), pochote (*Ceiba aesculifolia*), hormiguero (*Cordia alliodora*), huizache (*Acacia farnesiana*), tepehuaje (*Lysiloma acapulcensis*), guayacan (*Guaiacum coulteri*), huamúchil (*Pithecellobium dulce*), cacahunane (*Gliricida sepium*), mezquite (*Prosopis leavigata*), caulote (*Guazuma ulmifolia*), jabín (*Piscidia piscioura*), carnero (*Coccoloba barbadensis*), cuachanala (*Amphipterygium adstringens*), caobilla (*Swietenia humillis*),

papayo (*Gyrocarpus jatrophifolius*), trementina (*Zuelania guidonia*), patashté (*Leuhae speciosa*).

Específicamente este tipo de vegetación es la que ha sido más afectada por los cambios en el uso del suelo ya sean para el establecimiento de cultivos, pastizales o creación de centros urbanos. Cabe mencionar que para el municipio de San Pedro Mixtepec en cuanto a bosques y selvas, el INEGI (2009) reportó que la cobertura existente no es la original, sino que se trata de vegetación secundaria.

Manglar. Se localiza en la Planicie Costera de Oaxaca que limita con el océano pacífico en los distritos de Juquila (laguna de Manialtepec y Chacahua), Pochutla y Tehuantepec (Torres 2004 *In: García-Mendoza et al.* 2004). Este tipo de vegetación se encuentra en las orillas de las lagunas costeras o desembocaduras de ríos, en donde hay zonas de influencia de agua del mar. Es una formación leñosa, densa, frecuentemente arbustiva, o bien arborescente de 2 a 25 m de altura. Las especies que lo componen son de hoja perenne, algo suculenta y de borde entero. El sistema radicular de algunas especies presentan raíces zancas y neumatóforos que cumplen la función de sostén en el fondo lodoso y de respiración radical, pues el sustrato es muy pobre en oxígeno. Otra característica de los componentes de esta comunidad es la elevada presión osmótica de sus tejidos y la frecuente viviparidad, de manera que los propágulos consisten ya de plántulas y así el período crítico de la germinación puede llevarse a cabo fuera del medio salino. Representan el 0.8% del municipio y se distribuyen al rededor de la laguna de Manialtepec.

En México son cuatro las especies de plantas más características del manglar: mangle rojo (*Rhizophora mangle*), mangle negro (*Avicennia germinans*), mangle blanco

(*Laguncularia racemosa*) y mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*), estas cuatro especies se encuentran amenazadas (D.O.F. 2010). La importancia ecológica de los manglares está dada por la gran cantidad de servicios que brinda tales como filtro natural de contaminantes, retención de la arena de las playas, captura de los gases de invernadero, barrera natural contra las mareas y los vientos, abastecimiento de mantos freáticos. Además de la utilidad de su madera en la elaboración de carbón, en la construcción, etcétera (CONABIO 2008).

Pastizales. Tipo de vegetación caracterizado por el predominio de gramíneas (pastos o zacates) o graminoides. Su presencia está determinada por el clima, las condiciones del suelo o bien por el disturbio ocasionado por el hombre y sus animales domésticos. En general son comunes en regiones semiáridas y de clima fresco, además son favorecidos por las zonas planas o de topografía ligeramente ondulada. De acuerdo con el INEGI (2009) la mayoría de los pastizales son cultivados e inducidos. El Pastizal inducido surge como consecuencia de la eliminación de la cobertura original de cualquier tipo de vegetación, por el abandono de áreas agrícolas o bien como producto de áreas que se incendian con frecuencia. Un pastizal cultivado es aquel que se introdujo intencionalmente y requirió de labores de establecimiento y cultivo, dando lugar a los potreros. La coloración amarillenta pálida es característica durante la mayor parte del año y solo reverdece en la temporada de lluvias. Las especies de pastos más comunes en las zonas tropicales son: guinea (*Panicum maximum*), estrella de África (*Cynodon plectostachyus*) y llanero (*Andropogon gayanus*) (Centro Regional Universitario Sur-UACH 2008).

Áreas agrícolas. Se refiere a los terrenos destinados a la siembra de cultivos. En San Pedro Mixtepec se presentan dos tipos de agricultura: 1) De riego eventual: se denomina así cuando la irrigación es parcial durante todo el ciclo vegetativo del cultivo; 2) De

temporal: se refiere a los terrenos en los que el ciclo vegetativo de los cultivos depende del agua de lluvia. En el municipio esta actividad se basa en la técnica denominada roza-tumba-quema, la cual origina la pérdida gradual de la capa superficial y la fertilidad de los suelos, los cultivos que se siembran permanecen en el terreno un tiempo variable pero no mayor a un año y el cultivo principal es el maíz (SAGARPA 2010). De acuerdo con Serrano (2008) las variedades que se recomiendan cultivar en zonas que dependen del agua de temporal, entre ellas San Pedro Mixtepec son: VS-536, VS-535, V531, V532 o V-424, esta última por su ciclo precoz. La agricultura en su forma original provoca la formación de complejos mosaicos de pequeñas áreas deforestadas y distintas fases de vegetación secundaria a su alrededor.

Cuerpos de agua. La laguna de Manialtepec es el único cuerpo de agua, la cual se encuentra entre los límites del Municipio de San Pedro Mixtepec y San Pedro Tututepec (INEGI 2003a).

Áreas sin vegetación. Se incluyen los eriales y suelos salinos, depósitos litorales, jales, dunas y bancos de ríos que se encuentran desprovistos de vegetación o que esta no es aparente, y por ende no se le puede considerar bajo alguno de los conceptos de vegetación (INEGI 2005).

Zonas urbanas. Se consideran aquellas áreas donde predominan las construcciones tales como fraccionamientos, hoteles, pequeñas comunidades, etc. De acuerdo con INEGI (2003a) las zonas más urbanizadas de la jurisdicción son: la Ciudad de Puerto Escondido, Bajos de Chila y San Pedro Mixtepec (Cabecera Municipal).

5.2. Material y equipo

El material utilizado para conocer la dinámica del uso del suelo del Municipio de San Pedro Mixtepec constó de tres imágenes satelitales (Tabla II). Dos del satélite Landsat de los sensores TM del 29 de abril de 1990 y ETM+ del 8 de abril de 2000, ambas adquiridas gratuitamente del portal Web de Global Land Cover Facility, de la Universidad de Maryland ([//glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml](http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml)) en formato GeoTIFF, Datum WGS84; y una imagen Spot 5 del sensor HRG del 26 de enero de 2010 en formato Tiff y Datum WGS84, proporcionada por Spot Image, S.A. por conducto de la ERMEXS (Estación de Recepción México de la Constelación Spot) con la cual la UMAR realizó un convenio para la transferencia de la imagen.

Tabla II. Descripción de las imágenes de satélite utilizadas en el estudio.

Satélite	Landsat 4		Landsat 7		Spot 5
Sensor	TM		ETM+		HRG
Fecha de adquisición	29 de abril de 1990		8 de abril de 2000		26 de enero de 2010
Fuente	GLCF		GLCF		ERMEXS
Path / Row	24 / 49		24 / 49		594 / 318
Proyección	UTM 14		UTM 14		UTM 14
Datum	WGS 84		WGS 84		WGS 84
Área de cobertura	80 x 80 Km		80 x 80 Km		60 x 60 Km
Bandas	Resolución espacial (m)	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial (m)	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial (m)
Banda 1	28.5	0.45-0.52	28.5	0.50-0.59	10
Banda 2	28.5	0.52-0.60	28.5	0.61-0.68	10
Banda 3	28.5	0.63-0.69	28.5	0.78-0.89	10
Banda 4	28.5	0.76-0.90	28.5	1.58-1.75	20
Banda 5	28.5	1.55-1.75	28.5	No	No
Banda 6	120	10.4-12.5	60	No	No
Banda 7	28.5	2.08-2.35	28.5	No	No
Pancromática	No	0.52-0.90	15	0.48-0.71	2.5

Fuente: Metadato de las imágenes Landsat y Spot.

El material en formato digital se integró por ortofotos (D14B16b, D14B16c, D14B16f y D14B17a) (INEGI 1999), la carta de uso del suelo y vegetación D14-3, escala 1:250,000 (INEGI 1989) y la carta de uso del suelo, escala 1:1,000,000 (INEGI-INE 1996), carta de uso del suelo y vegetación de INEGI modificado por CONABIO (CONABIO 1999), las cartas topográficas (D14B16, D14B17, E14D86, E14D87), escala 1:50,000 (INEGI 2003a).

La información vectorial la constituyeron los datos de los Inventarios Nacionales Forestales de 1994 (Sorani & Álvarez 1996) y 2000 (Palacio-Prieto *et al.* 2000) para el Estado de Oaxaca adquiridos del portal de la Comisión Nacional Forestal (www.conafor.gob.mx/) y las cartas topográficas (D14B16, D14B17, E14D86, E14D87) (INEGI 2003a), a partir de las cuales se vectorizaron las vías de comunicación. Cada información utilizada presentó diferentes parámetros geográficos (Anexo 3), por ello fue necesario realizar su estandarización a la proyección UTM (Universal Transversal Mercator) con Datum y Elipsoide WGS84 (Sandoval 2003).

El equipo de cómputo utilizado en el trabajo de gabinete fue un procesador Intel® Pentium® 4, disco duro de 74.4 Gb y 760 Mb de memoria RAM donde se ejecutaron los software's IDRISI Kilimanjaro, ERDAS IMAGINE 8.4 para el manejo de las imágenes de satélite, ArcView versión 3.3 para el manejo de material en formato raster pancromático y vectorial, y ArcGIS 9.2 para la rectificación de la imagen Spot y la edición de los mapas. El lugar de desarrollo de la investigación fue el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) de la Universidad del Mar, Campus Puerto Escondido.

VI. Métodos

6.1. Pre-procesamiento de las imágenes satelitales

6.1.1. Análisis visual y de la información estadística soporte de las imágenes

Consistió en el reconocimiento de las imágenes y la información que contiene comparándola con la información vectorial de INEGI debidamente verificada con la finalidad de encontrar posibles errores geométricos. La exploración visual también se realizó para encontrar posibles errores radiométricos que pudieran obstaculizar la interpretación certera de los elementos. Así mismo se llevó a cabo el análisis de los histogramas y estadísticas de cada una de las bandas (Tabla III) para determinar las bandas a utilizar en la composición de colores.

Tabla III. Estadísticas de las imágenes de satélite utilizadas en el estudio.

Landsat TM de 1990				
Bandas	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar
1	73	255	106.92	15.32
2	21	170	39.65	9.26
3	12	226	49.42	18.24
4	1	177	69.26	24.69
5	2	254	120.97	53.92
7	1	255	55.62	29.71
Landsat ETM+ de 2000				
1	67	255	94.63	10.24
2	45	255	76.90	14.25
3	20	256	84.91	25.24
4	6	154	69.58	21.16
5	1	255	130.03	52.36
7	1	255	82.30	36.64
Spot HRG de 2010				
1	7	255	170.59	62.00
2	25	255	58.98	27.12
3	59	255	95.56	21.46
4	1	255	134.29	51.14

Fuente: Metadatos de las imágenes Landsat y Spot.

6.1.2. Recorte de las imágenes

Con el fin de facilitar la manipulación, el análisis y clasificación de las imágenes se cortaron las escenas, generando una subescena de cada imagen que enmarcó el área donde está inmerso el Municipio de San Pedro Mixtepec. La delimitación se realizó por medio de la determinación de coordenadas máximas y mínimas en la proyección UTM (Tabla IV).

Originalmente las imágenes Landsat presentaban una resolución de 28.5x28.5 m, pero debido a que es mejor manejar resoluciones en valores enteros, los píxeles se llevaron a una resolución de 30x30 m (Solís-Moreno *et al.* 2006), esto se hizo a cada una de las bandas excepto a la banda 6 de ambos sensores. En el caso de la imagen Spot se manejó la resolución original de sus bandas multiespectrales 10x10 m, para el caso de la banda 4 (20x20 m) se igualó su resolución al resto de las bandas.

Tabla IV. Propiedades de los recortes de las imágenes.

Propiedades	Landsat		Spot	
	UTM zona 14	Geográfica	UTM zona 14	Geográfica
X mínima	691148	16° 01' 55.06039"	691235	16° 01' 59.26484"
X máxima	725198	15° 50' 50.94591"	725075	15° 51' 02.69463"
Y mínima	1753194	96° 53' 49.82102"	1753554	96° 53' 53.83251"
Y máxima	1773294	97° 12' 48.21161"	1773424	97° 12' 45.24755"
Columnas	1135		3384	
Filas	670		1987	
Resolución	30		10	

Fuente: Elaboración propia.

6.1.3. Corrección geométrica

Las imágenes Landsat ya estaban georreferenciadas y rectificadas, solo se ajustó la dimensión de píxeles a valores enteros (30x30 m). Por lo que respecta a la imagen Spot

de 2010, está ya había sido georreferenciada pero presentaba un problema de desplazamiento de aproximadamente 50 m con orientación norte-sur y oeste-este, mismo que fue corregido tomando como base los vectoriales de las vías de comunicación de las cartas topográficas (D14B16, D14B17, E14D86, E14D87), escala 1:50,000. Se manejó un total de 16 puntos de control (Anexo 4) y el error medio cuadrático (RMS) obtenido fue de 9.99, el algoritmo utilizado en el remuestreo de la imagen fue Nearest Neighbor (vecino más cercano). El tamaño del píxel se modificó debido a la rectificación, por ello se estandarizaron los píxeles a una resolución de 10x10 m. Únicamente se trabajó con las bandas multispectrales (1, 2, 3 y 4) esto se realizó en el programa ArcGIS 9.2.

6.1.4. Realce de imágenes

La finalidad de los realces es mejorar la visualización e identificación de los elementos presentes en la imagen. Las imágenes Landsat fueron tratadas mediante un estiramiento lineal de los niveles digitales (ND) a través del módulo STRETCH-Linear (Fig. 2), donde el ND mínimo y el ND máximo de cada banda tiene valores de 0 a 255 y el resto de los píxeles se distribuyen de manera lineal entre ambos valores extremos con lo que se generan bandas más contrastadas y nítidas. A la imagen Spot no se le aplicó ningún tipo de realce.

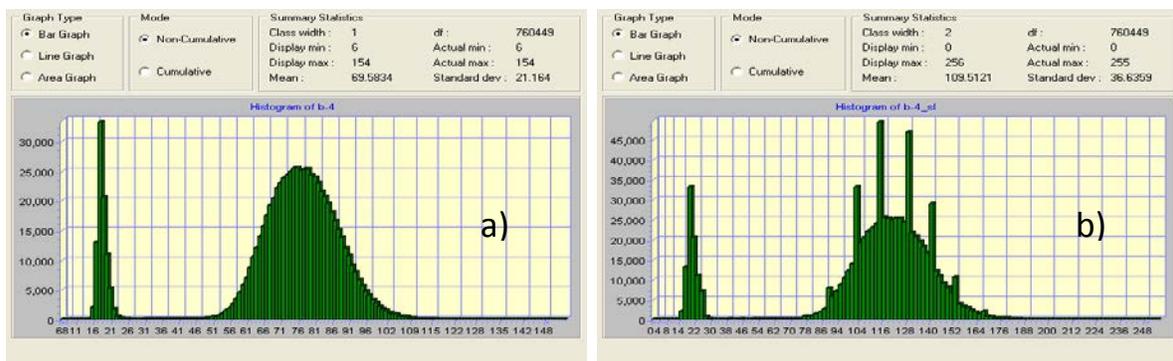


Figura 2. Estrechamiento lineal de la banda 4 Landsat ETM+ a) banda original (6-154), b) estrechada en forma lineal (0-255).

6.1.5. Composición de colores

Consiste en la asignación de 3 bandas por imagen, a un color primario RGB (por sus siglas en inglés, rojo, verde y azul), dependiendo de la asignación de las bandas en cada canal así será la composición de color que se obtendrá, los elementos que resaltarán y la agrupación de los valores de los píxeles.

Para las imágenes Landsat se emplearon las bandas 2 (verde), 3 (rojo) y 4 (infrarrojo cercano) por presentar las varianzas más altas y las correlaciones más bajas, resultando una composición en falso color 4-3-2 (RGB) (Mas & Ramírez 1996, Lizano *et al.* 2001, García *et al.* 2002, Weng 2002); y en el caso de la imagen Spot se generó una composición en falso color (3-2-1) (Fig. 3). Las composiciones se hicieron en IDRISI con el modulo COMPOSITE.

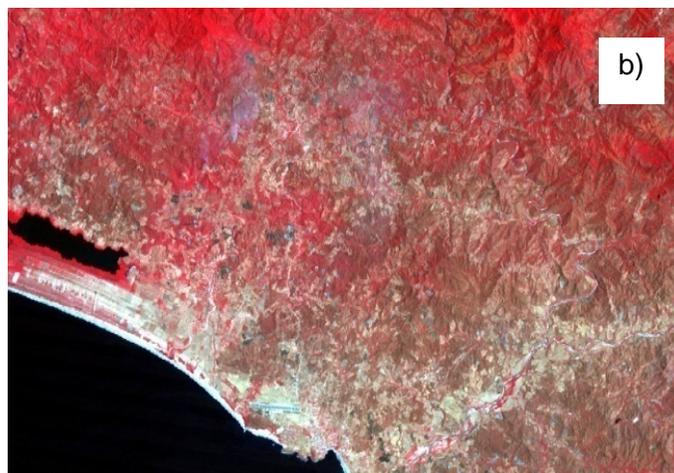




Figura 3. Composiciones de color. a) Landsat TM 1990, b) Landsat ETM+ 2000, c) Spot HRG 2010.

6.1.6. Identificación de clases

Se realizó la sobreposición de los mapas de uso del suelo disponibles en formato vectorial a escalas 1:50,000 y 1:1,000,000, las ortofotos digitales jugaron un papel muy importante por la alta resolución (1.5 m), esto se hizo en ArcView 3.3 y las composiciones en falso color de las imágenes analizando los valores de los píxeles en IDRISI Kilimanjaro, a manera de identificar las clases presentes en el Municipio de San Pedro Mixtepec. Los criterios en que se basó la identificación de cada una de las clases se muestran en la Tabla V. La interpretación visual se realizó considerando las siguientes características: tono, color, textura, contexto espacial y otros criterios (sombras, forma y tamaño).

Tabla V. Categorías de usos del suelo y cobertura forestal y los criterios para su identificación en la composición en falso color de las imágenes Landsat (4-3-2) y Spot (3-2-1).

Clase	Criterios para la selección de los campos de entrenamiento
Bq	Coloración roja (opaco), textura muy rugosa, se ubica en las partes altas, sus ND son muy bajos.
SMq	Coloración roja baja y rosa, textura rugosa, se ubica tanto en las parte bajas como altas, los ND son muy semejantes al bosque de encino y mangle.
SBC	Coloración rojiza y café muy fuerte, textura ligeramente rugosa, se ubica en la mayor parte de la imagen.
Vm	Coloración roja intensa, textura rugosa, se ubican alrededor de los cuerpos de agua y al nivel del mar, sus ND son semejantes al bosque de encino y la selva mediana subperennifolia, algunos se mezclan con la SMq debido a que el Vm presenta problemas de perturbación.
Pa	Coloración gris oscuro, textura lisa, se ubican por lo general alrededor de los áreas agrícolas, rurales y urbanas, los ND son muy parecidos a los de las zonas agrícolas y la selva baja caducifolia pero se diferencian de la forma irregular de sus polígonos y por encontrarse en las partes altas asociados a SBC y SMq.
Za	Tonos de color gris-azul claro (superficies sin cobertura o muy ligera), gris-café (suelos con alguna cobertura o algún tipo de humedad) se ubica en las partes planas y cercanas a las áreas rurales y urbanas), textura semi-lisa, tiene límites definidos y sus ND son altos en la banda roja y verde y normal en la banda azul.
Ca	Se identificaron por la forma, coloración oscura por la gran cantidad de energía que absorben, por su ubicación muy cerca a los litorales y por presentar los ND más bajos.
Au	La tonalidad azul a gris y presenta coloraciones rojizas que indican presencia de vegetación urbana dispersa, los ND son muy semejantes a las áreas sin vegetación aparente.
Dv	El color claro brillante, se les encuentra en el límite entre el mar y tierra firme, en los márgenes y dentro de los ríos, en áreas urbanas, áreas rurales (canchas, calles de terracería), los valores digitales son cercanos a 255.

Bq= Bosque de encino, SMq= Selva mediana subperennifolia, SBC= Selva baja caducifolia, Vm= Manglar, Pa= Pastizal, Za= Zonas agrícolas, Ca= Cuerpos de agua, Au= Áreas urbanas, Dv= Áreas sin vegetación aparente.

Fuente: Elaboración propia.

La leyenda para las categorías se definieron de acuerdo a la clasificación hecha por el INEGI (2005), en la carta uso del suelo serie II, escala 1:50,000. Excepto para las áreas urbanas, pastizales, zonas agrícolas y los cuerpos de agua.

6.2. Clasificación supervisada de las imágenes de satélite

Se optó por el método de la clasificación supervisada debido al conocimiento previo que se tiene de los usos del suelo y las coberturas forestales presentes en el área de estudio y a la referencia proporcionada por la carta de uso del suelo y vegetación. En la clasificación de las imágenes Landsat se utilizaron las bandas multiespectrales, excepto la banda 6 (infrarrojo térmico) para ambos sensores (TM y ETM+). En el caso de la imagen Spot HRG se utilizaron las bandas multiespectrales.

En la clasificación de las imágenes Landsat se identificaron nueve categorías, esto se limitó a las categorías manejadas por los Inventarios Nacionales Forestales de 1990 y 2000 y la resolución de las imágenes. La baja resolución espacial de las imágenes Landsat (30x30 m), se compensa con la resolución espectral alta. Las imágenes Spot presentan una resolución más fina (10x10 m) pero presenta una baja resolución espectral (Eastman 2003). Por lo cual se manejaron las nueve categorías identificadas en las imágenes Landsat a fin de poder realizar la comparación de los mapas de las tres fechas.

El primer paso en la clasificación supervisada fue la selección de las áreas de entrenamiento, que son los píxeles representativos de cada categoría identificada y sirven de referencia para que el clasificador genere distintos parámetros estadísticos de los ND de cada clase (mínimo, máximo, media, desviación estándar) y así clasificar todas las escenas de las imágenes Landsat y Spot (Eastman 2003, Berlanga-Robles & Ruiz-Luna 2007), el tamaño mínimo manejado fue de 10 píxeles por categoría por banda (Eastman 2003), los campos de entrenamiento se generaron en las composiciones falso color para cada imagen con el módulo DIGITIZE. Cada categoría presentó una firma espectral (respuesta espectral ante ciertas longitudes de onda), su creación y visualización se obtuvo con los módulos MAKESIG y SIGCOMP.

Se aplicó el clasificador rígido de máxima verosimilitud MAXLIKE (García *et al.* 2005, Dewan & Yamaguchi 2009, Figueroa-Jáuregui 2011) con un porcentaje de confianza del 99% y se utilizaron todas las bandas. Este clasificador está basado en la teoría de la probabilidad bayesiana. Al usar la información de un grupo de sitios de entrenamiento, MAXLIKE emplea la media y los datos de varianza/covarianza de las firmas para estimar la probabilidad posterior de que un píxel pertenezca a cada clase, con base a su respuesta espectral (Eastman 2003). A razón que con este clasificador no se hizo una buena discriminación de los cuerpos de agua se aplicó el clasificador rígido de Mínima Distancia MINDIST (Vega *et al.* 2008), mismo que está basado en los datos de sitios de entrenamiento y caracteriza cada clase por su posición media sobre cada banda. Para clasificar un píxel desconocido, MINDIST examina entonces la distancia desde ese píxel hasta cada clase y le asigna la identidad de la clase más cercana. Con este último clasificador se utilizaron los mismos campos de entrenamiento y bandas empleadas con MAXLIKE.

En la clasificación final de las imágenes Landsat y Spot se extrajeron los cuerpos de agua y se pasaron a la clasificación hecha con "MAXLIKE" (Segura-Castruita *et al.* 2004, Díaz *et al.* 2008), este proceso se realizó con los módulos OVERLAY & RECLASS.

Posteriormente se hizo el recorte de las clasificaciones de cada año considerando el polígono de San Pedro Mixtepec manejado por INEGI (2003c) a través del módulo OVERLAY, después se calculó el área de cada uso del suelo y cobertura forestal. Cabe mencionar que los límites del Municipio con el Océano Pacífico fueron editados en ArcView 3.3 con ayuda de las imágenes Landsat, y este nuevo polígono fue el que se utilizó en el estudio.

6.2.1. Análisis de la separabilidad espectral

Este proceso permite evaluar el grado en el cual las categorías pueden ser distinguidas espectralmente, la Tabla VI muestra los grados de separabilidad que se pueden tener en un grupo de firmas espectrales mediante el método de Divergencia Transformada (DT) (García & Mas 2008). De cierta manera con esto también se evalúan los sitios de entrenamiento tomados por categoría identificada.

Tabla VI. Grado de separabilidad entre firmas espectrales.

Valor DT	Grado de separabilidad
0 – 1,700	Pobre
1,700 – 1,900	Suficiente
1,900 – 2,000	Buena

Fuente: Jensen 1996 *In*: Díaz *et al.* 2008.

6.3. Evaluación de la confiabilidad

Toda base de datos geográficos presenta un grado de incertidumbre que depende principalmente de la calidad de los insumos y de las metodologías adoptadas para su elaboración (Mas *et al.* 2003). Por lo anterior las clasificaciones se sometieron a una evaluación de confiabilidad.

La clasificación de 1990 se evaluó con la información del Inventario Nacional Forestal del Estado de Oaxaca de 1994 (Sorani & Álvarez 1996), el cual se generó a partir de la actualización de la cartografía de INEGI serie I con base en el análisis visual de imágenes Landsat, pero la actualización fue parcial ya que solo se hizo para las áreas forestales, además el sistema clasificatorio se deriva del sistema de la FAO. Por lo anterior en algunos estudios recomiendan hacer la validación de mapas utilizando la cartografía de uso del suelo de INEGI serie I, por la compatibilidad de su clasificación (Mas *et al.* 2004, Mas *et al.* 2004, Duran *et al.* 2007). El Inventario Nacional Forestal de 1994 fue utilizado

porque era la información disponible (Pedraza *et al.* 2009), por ello para hacer compatible sus categorías con las categorías obtenidas en la clasificación de la imagen Landsat de 1990, se realizó una reclasificación de sus polígonos considerando su tamaño y ubicación. Además se consideraron las categorías manejadas por el Inventario Nacional Forestal 2000, ya que las categorías del inventario de 1994 eran muy generales y sus polígonos grandes.

Tabla VII. Reclasificación de las categorías de la información tomada como real (INF 1994 y 2000).

INF 1994	Reclasificación	INF 2000	Reclasificación
Bosques	Bosque de encino	Bosque de encino	Bosque de encino
Bosques	Selva mediana subperennifolia	Bosque de encino-pino	
Otras tierras	Cuerpos de agua y Mangle	Bosque mesófilo de montaña	
Otras tierras	Selva baja caducifolia, Áreas urbanas, Zonas agrícolas, Pastizal y Selva mediana subperennifolia	Selva mediana caducifolia y subcaducifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	Selva mediana subperennifolia
Otras tierras	Pastizal	Selva mediana caducifolia y subcaducifolia	Selva baja caducifolia
Otras tierras	Zonas agrícolas	Vegetación de dunas costeras	
Otras tierras	Zonas agrícolas y Selva baja caducifolia	Manglar	Manglar
Otras tierras	Áreas sin vegetación aparente	Pastizal cultivado	Pastizal
		Agricultura de temporal con cultivos anuales	Zonas agrícolas
		Cuerpo de agua	Cuerpo de agua
		Asentamientos humanos	Áreas urbanas
		Áreas sin vegetación aparente	Áreas sin vegetación aparente

*En ambos inventarios se realizó un ajuste de las áreas sin vegetación aparente. El Inventario Nacional Forestal de 1994 no contó con polígonos para la representación de las zonas urbanas.

Fuente: Elaboración propia.

La confiabilidad de la clasificación de 2000 se validó con el Inventario Nacional Forestal del Estado de Oaxaca del 2000 (Palacio-Prieto *et al.* 2000), este se generó de la modificación y actualización de la cartografía serie II de INEGI, con base en la interpretación visual de imágenes Landsat ETM+. Para hacerlo compatible con las categorías obtenidas se hizo la reclasificación de sus polígonos. La Tabla VII muestra la reclasificación de los Inventarios Nacionales Forestales de 1994 y 2000 a las categorías obtenidas en las clasificaciones de 1990 y 2000.

Para la clasificación de 2010 no se contaba con información real o base de datos geográficos para efectuar la validación. Para obtenerla se llevó a cabo un muestreo de campo que consistió recorrer el Municipio de San Pedro Mixtepec e identificar las nueve categorías manejadas en las clasificaciones de las imágenes Landsat, tomando su ubicación, altitud y una fotografía de cada categoría identificada. Con la información obtenida se generó una base de datos, la cual se utilizó para la validación de la imagen Spot de 2010

6.4. Muestreo sobre mapas verificados y de campo

El diseño del muestreo de los mapas verificados (INF 1994 y 2000) y de la información de campo fue aleatorio estratificado (Janssen & Van der Wel 1994, Petit *et al.* 2001, Wright *et al.* 2003), el método fue a través de puntos (Mas 2006, Solís-Moreno *et al.* 2006, Dupuy *et al.* 2007). Sobre la intensidad de muestreo no existe un consenso para la información base ni para la verificación en campo, por ello se decidió tomar como referencia a Congalton (*In: Mas et al.* 2003), quien recomienda verificar al menos 50 puntos por categoría.

El muestreo en ambos inventarios forestales se realizó sobre los mapas generados de la reclasificación de sus categorías. Se tomaron 50 puntos de manera aleatoria por categoría, en total se obtuvieron 450 puntos por inventario para realizar la validación de la clasificación de los mapas de 1990 y 2000.

El muestreo en campo se realizó del 10 de abril al 9 de mayo de 2010, a través de recorridos con ayuda de las cartas topográficas (D14B16, D14B17, E14D86, E14D87) escala 1:50,000 y la imagen Spot de 2010 para ubicar los accesos y carreteras, un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) Garmin eTrex Vista® HCX utilizado para levantar los puntos de los usos del suelo y coberturas forestales observados en la imagen y para reducir el error de posición, las coordenadas fueron tomados en la parte central de cada categoría (Franco *et al.* 2006), con el altímetro-barómetro se registró la altitud de cada punto y con la cámara digital se tomaron las fotografías para cada uno de los puntos. Los datos registrados en cada sitio fueron: el número de punto y sus coordenadas UTM (Datum y Elipsoide WGS84), la localidad, el paraje, la fecha de su verificación, el uso de suelo y cobertura forestal, y una fotografía por cada punto verificado (Anexo 5). La intensidad de muestreo en campo estuvo condicionada a la accesibilidad al terreno y los costos. Algunos autores como Ramírez (2002), Zimmermann & Horna (2003) y Reyes *et al.* (2006) tomaron 37, 410 y 320 puntos en campo, respectivamente. El muestreo se realizó en la temporada de estiaje para coincidir con la fecha de captura de la imagen Spot y así obtener información más real, los puntos registrados fueron 324.

6.5. Análisis de la confiabilidad de la clasificación de las imágenes

Para analizar la confiabilidad de las clasificaciones se generaron matrices de error o confusión (Story & Congalton 1986) que consiste en comparar la clasificación de las imágenes con la información real o de referencia, esta última se refiere a los mapas de

vegetación y usos de suelo existentes, datos de inventarios, fotointerpretación y toma de puntos geográficos en campo (RSAC 2000 *In*: Rincón 2003).

Generalmente en la clasificación de las imágenes existen dos tipos de errores: El error de omisión se refiere a todos los píxeles que pertenecen a una cierta clase, pero que no fueron clasificados en tal categoría. El error de comisión Se refiere a aquellos píxeles clasificados en una categoría pero que erróneamente fueron clasificados, ya que en realidad pertenecen a otra categoría (Eastman 2003, Congalton 2005).

Las mediciones de las precisiones en las matrices de error se obtuvieron de acuerdo a Speranza & Zerda (2005) como a continuación se indica:

Precisión global: Se divide el total de píxeles correctamente clasificados (valores sombreados en las matrices de error) entre el total de píxeles de referencia.

$$PG\% = \frac{\sum_{i=1}^r X_{ii}}{N}$$

Donde: PG% = Precisión global en porcentaje.

r = Número de filas de la matriz.

X_{ij} = Número de observaciones en la fila i y columna j (diagonal mayor).

N = Número total de puntos de muestreo.

Precisión del productor: Se divide el total de píxeles clasificados correctamente en una categoría y el número total de píxeles asignados a esa categoría.

$$PP\% = \frac{X_{ii}}{X_{+i}}(100)$$

Donde: PP% = Precisión del productor en porcentaje.

X_{+j} = Totales marginales de la columna j .

X_{jj} = Valor de la diagonal de dicha columna.

Precisión del usuario: Se divide el número total de píxeles correctos en una categoría por el número total de píxeles que son efectivamente pertenecientes a esa categoría.

$$PU\% = \frac{X_{ii}}{X_{i+}}(100)$$

Donde: PU% = Precisión del usuario en porcentaje.

X_{i+} = Totales marginales de la fila i .

X_{ii} = Valor de la diagonal de dicha fila.

La confiabilidad se evaluó con el índice de concordancia de Kappa (Stehman 1996, Foody 2004), el valor mínimo de confiabilidad aceptado es del 80% ($K = 0.80$) (Janssen & Van der Wel 1994, Franco *et al.* 2006).

Fórmula para calcular el índice de Kappa de acuerdo con Hudson & Ramn (*In: Speranza & Zerda 2005*):

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \cdot x X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \cdot x X_{+i})}$$

Donde: K = Índice de Kappa

r = Número de filas en la matriz

X_{ij} = Número de observaciones en la fila i y en la columna j

- X_{i+} = Totales marginales de la fila i
- X_{+i} = Totales marginales de la columna i
- N = Número total de píxeles de referencia

El análisis o confiabilidad de la clasificación se realizó con el módulo ERRMAT de IDRISI Kilimanjaro, de donde se crearon las matrices de error y los índice de Kappa, para ello se utilizaron los puntos de muestreo de la información real (INF 1994 y 2000 y los datos de campo) y las clasificaciones de cada imagen (1990, 2000 y 2010).

6.6. Cálculo de la tasa de cambio

La tasa de cambio de uso del suelo y cobertura forestal se calculó utilizando la fórmula de la FAO (1996), multiplicada por 100 para obtener el valor en porcentaje. Esta tasa indica la velocidad a la que ocurren los cambios en una determinada región y sirve para comparar y reconocer si un territorio es más dinámico o estable que otro.

$$t = \left[1 - \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right]^{1/n} - 1$$

Donde: t = Tasa de cambio.

S_1 = Superficie al comienzo del estudio.

S_2 = Superficie en la fecha dos.

n = Número de años del período

6.7. Transición de las clases en el tiempo

El paisaje puede considerarse como un mosaico de usos de suelo y coberturas forestales que se encuentran en un constante proceso de cambio desde y hacia las diferentes

categorías de uso (Bocco *et al.* 2001). El análisis de los cambios de uso del suelo y cobertura forestal se realizó mediante la sobreposición de los mapas (Guerra & Ochoa 2006, Franco *et al.* 2006), esto a través del módulo CROSSTAB de IDRISI Kilimanjaro, creando así una matriz de cambio general para el período de estudio (1990-2010). Para lo anterior se requirió de igualar las características de los mapas en cuanto la resolución de sus píxeles y la dimensión de los mapas (Coordenadas mínimas y máximas), por ello para este fin se ajustó el mapa de la imagen Spot (2010) al mapa de la imagen Landsat (1990). Con la matriz de transición se explican todos los cambios de cobertura sufridos en el período y compara el estado inicial de los píxeles y su estado final (Zimmermann & Horna 2003).

6.8. Generalización

Este proceso se refiere a la adecuación de las imágenes clasificadas como un verdadero mapa, donde generalmente no representan particularidades (píxeles aislados de las categorías) sino solo los aspectos más representativos (Salvatierra *et al.* 2003). Por lo anterior se aplicó un filtro del tipo mediana con un tamaño de 3x3 píxeles (García *et al.* 2005), para eliminar el efecto llamado “sal y pimienta” en las clasificaciones. Finalmente se exportó al programa ArcGIS 9.2 donde se editó y elaboró la cartografía final.

VII. Resultados y Discusión

7.1. Identificación de clases

El resultado de la reclasificación de las categorías de uso del suelo y cobertura vegetal manejada por los Inventarios Nacionales Forestales de 1994 y 2000 fueron nueve categorías, y se corroboraron mediante recorridos en campo. La discriminación de las

clases se hizo a través de la identificación visual de los elementos geográficos en las imágenes Landsat TM de 1990 y ETM+ de 2000 (fuente para la generación de los INF 1994 y 2000), como guía se emplearon los mapas de uso del suelo y vegetación (INEGI 1989, INEGI-INE 1996, CONABIO 1999) y las ortofotos digitales (INEGI 1999). El resultado fueron cuatro tipos de vegetación forestal y cinco usos del suelo, dando un total de nueve categorías (Tabla VIII). Para fines de análisis posteriores se identificaron las mismas categorías en la imagen Spot HRG de 2010, ya que por la resolución de las imágenes Landsat no fue posible la identificación de más categorías que probablemente se observarían en la imagen Spot de una resolución de 10x10 m.

Tabla VIII. Categorías de usos del suelo y coberturas forestales identificadas para el Municipio de San Pedro Mixtepec, a través de la clasificación supervisada de las imágenes.

Simbología	Usos de suelo y coberturas forestales
Bq	Bosque de encino
SMq	Selva mediana subperennifolia
SBc	Selva baja caducifolia
Vm	Manglar
Pa	Pastizales
Za	Zonas agrícolas
Ca	Cuerpos de agua
Au	Áreas urbana
Dv	*Áreas sin vegetación aparente

* Se consideraron los depósitos litorales, dunas y bancos de ríos.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a INEGI (2005).

La discriminación de estas categorías resultan importantes considerando los estudios realizados en otras zonas tropicales por Berlanga-Robles & Ruiz-Luna (2006), Reyes *et al.* (2006), Dupuy *et al.* (2007) Duran *et al.* (2007), García & Mas (2008), quienes trabajaron con un menor número de clases y por lo tanto más generalizadas. En efecto, para definir las categorías influyen factores tales como la resolución y errores (nubes,

desplazamientos) en las imágenes, categorías manejadas por la información de referencia y en mayor parte los objetivos del estudio que se realiza (Franco *et al.* 2006, Gómez-Díaz *et al.* 2007).

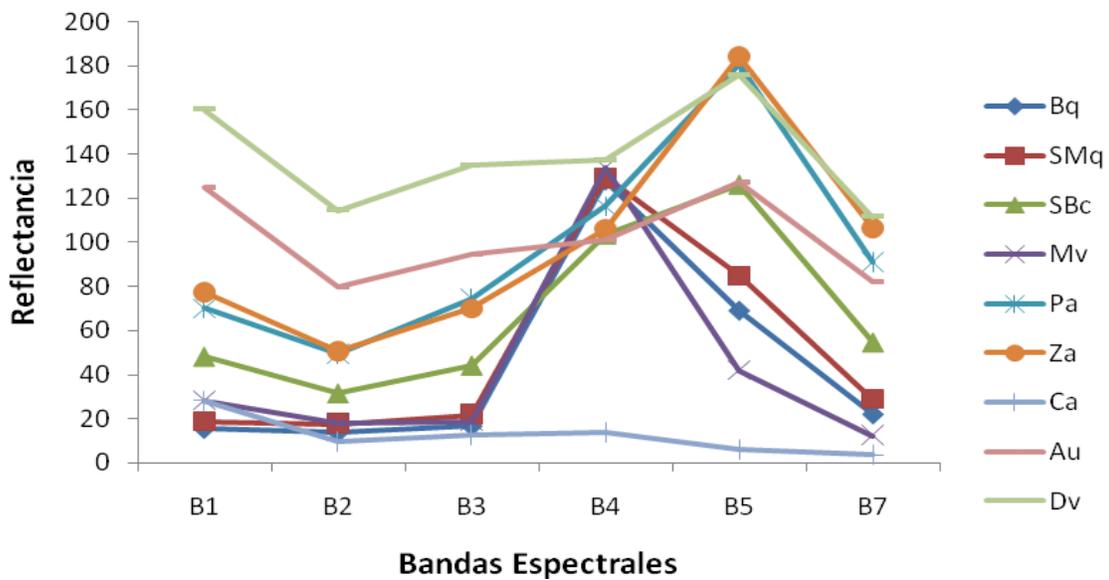
7.2. Clasificación supervisada

Después de aplicar los realces (estiramiento lineal) a las imágenes Landsat se encontró que la composición de color más indicada para la visualización de elementos geográficos fue la obtenida por las bandas 4-3-2 (falso color). En el caso de la imagen Spot no se aplicó ningún tipo de realce, sólo se hizo la rectificación de sus bandas multiespectrales (1-4) lo que arrojó un error medio cuadrático (RMS) de 9.99 menor al tamaño de un píxel (Salvatierra *et al.* 2003, Mas 2006, Frau *et al.* 2010). Para esta imagen la composición se realizó con las bandas 3-2-1 (falso color).

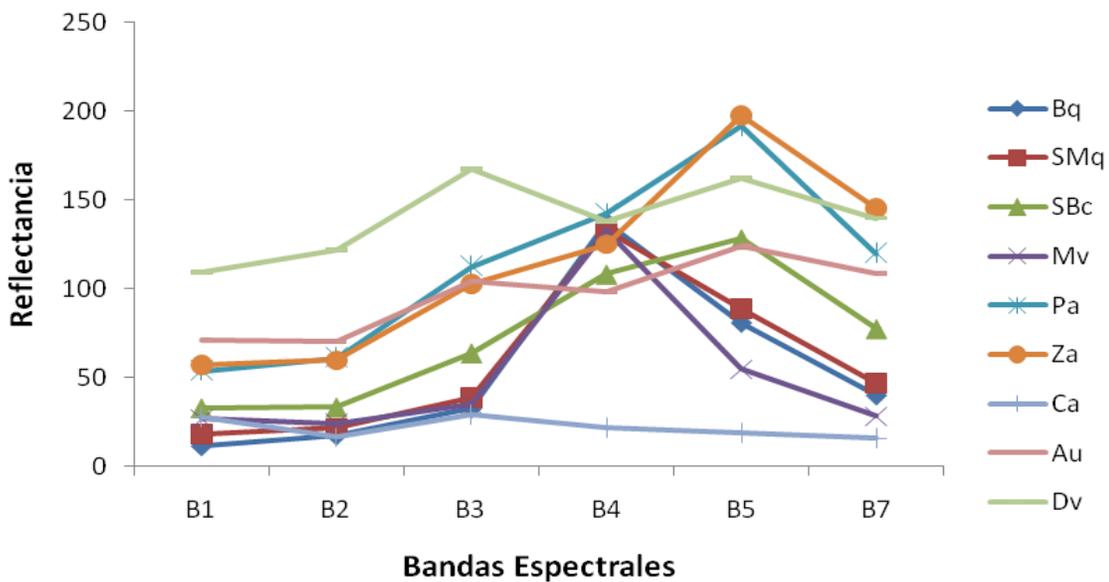
La figura 4 muestra las firmas espectrales de los uso del suelo y cobertura forestal por banda y por imagen analizada, cada categoría presenta un valor de reflectancia de acuerdo a cierta longitud de onda. Estas firmas no representan el 100% de la realidad, ya que existen categorías que, a pesar de ser diferentes generan reflectancias parecidas (Gutiérrez & Jegat 2005).

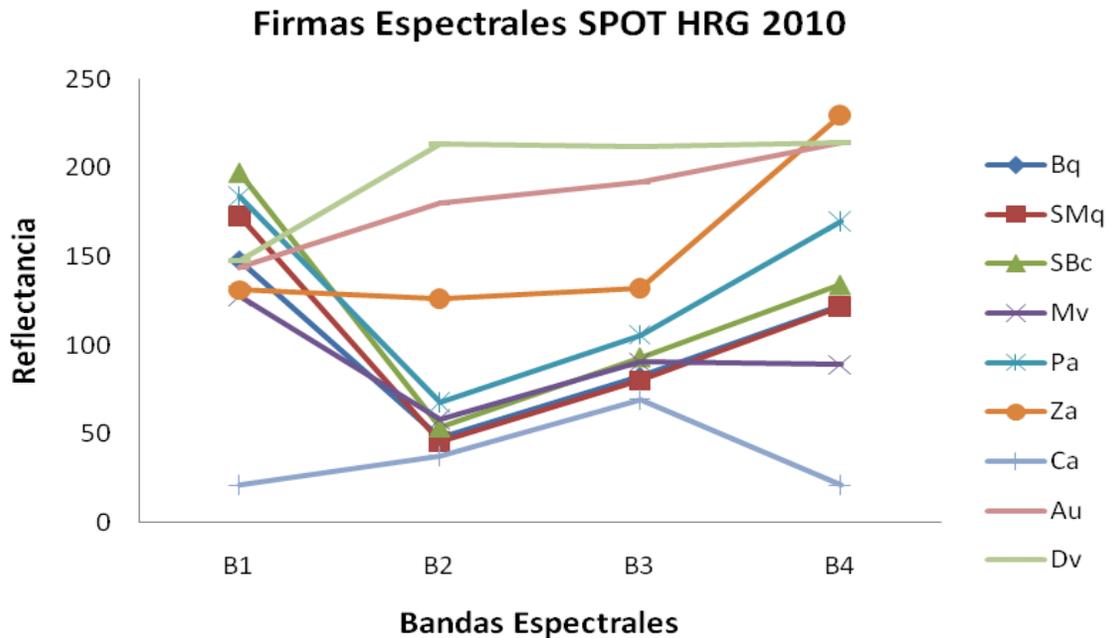
Del análisis de las firmas espectrales de las imágenes Landsat TM y ETM+, se observó que los usos del suelo presentaron una notable separación entre si, en cada una de las bandas de ambos sensores. Ordenados de mayor a menor reflectancia tenemos: a) Dv por ser suelos completamente desnudos reflejan la mayor parte de la luz solar, b) Au debido a la presencia de poca vegetación, misma que hace que los ND no sean tan altos,

Firmas Espectrales Landsat TM 1990



Firmas Espectrales Landsat ETM+ 2000





Bq= Bosque de encino, SMq= Selva mediana subperennifolia, SBc= Selva baja caducifolia, Vm= Manglar, Pa= Pastizal, Za= Zonas agrícolas, Ca= Cuerpos de agua, Au= Áreas urbanas, Dv= Áreas sin vegetación aparente.

Figura 4. Firmas espectrales de los usos del suelo y coberturas forestales en cada clasificación de las imágenes.

c) Pa y Za estas clases tuvieron sobreposición de sus firmas espectrales, por la semejanza de sus ND, presentan una escasa presencia de vegetación arbórea y d) Ca fue la categoría con valores de reflectancia más bajos, especialmente en las bandas del infrarrojo, de acuerdo con Palacios *et al.* (2006) el agua de mar presenta una menor reflectividad en comparación con los cuerpos de agua terrestres y además esto depende de la profundidad. Caso contrario ocurrió con las coberturas forestales, las cuales presentaron respuestas espectrales muy parecidas, estas coinciden con Flores-López & Scott (2000), quienes comentan que la vegetación adquiere valores bajos de reflectancia en las bandas del espectro visible (1, 2 y 3) y más elevados en el infrarrojo cercano (4). Solo SBc fue la única con una separación más notoria por presentar ND más elevados al resto de las coberturas, ya que la imagen fue adquirida en la época de secas, este tipo de

vegetación presentó un aspecto más seco (Vega *et al.* 2008). La similitud de las firmas de Bq, SMq y Vm se debió, principalmente a la presencia de follaje en la vegetación, lo que generó confusión al discriminarse entre sí. Finalmente se apreció que la banda 5 para ambos sensores de las imágenes Landsat presentó una buena separación para los usos de suelo y las coberturas forestales.

Para la imagen Spot HRG, los campos de entrenamiento para los usos del suelo se realizaron correctamente al tener diferentes reflectancias, caso similar con las imágenes Landsat. Con respecto a las coberturas forestales, se observó una mayor sobreposición de sus firmas especialmente en sus bandas. Por la fecha de captura de la imagen (enero) la vegetación contaba con mayor presencia de su follaje, lo que dificultó su buena discriminación, las sobreposiciones fueron dadas entre a) Bq y Vm, b) SBc y SMq.

Como se puede apreciar las categorías con firmas espectrales con mayor sobreposición fueron las coberturas forestales para los tres años analizados. La dificultad que se presentó al obtener los campos de entrenamiento se debió a la similitud de los ND entre estas categorías, coloración y textura de los píxeles, la fenología de la vegetación y la humedad, fueron los principales factores (Arango *et al.* 2005, Dukatz *et al.* 2005, Vega *et al.* 2008).

7.2.1. Análisis de la separabilidad espectral

Los resultados obtenidos mediante el análisis de separabilidad a través del método de Divergencia Transformada (Anexo 6), nos muestran la separabilidad pobre para cada uno de los años: para el año 1990 (intervalo de 1,535.16-1,659.07) entre a) Bq y SMq, b) SBc y Za; en el 2000 (1,677.4) fue dada por a) SMq y SBc; para 2010 la separabilidad pobre (intervalo de 1,321.52-1,348.15) estuvo dada entre a) SBc y Pa, b) Au y Dv. El grado de

separabilidad total para 1990, 2000 y 2010 fue de 1,964.57, 1,974.93 y 1,951.18, respectivamente y corresponde a los valores más altos (Tabla VI) (García & Mas 2008), por lo cual se puede decir que la composición de bandas y la discriminación de las categorías fueron buenas (Arango *et al.* 2005). La SBc para las tres fechas analizadas presentó una reducida separabilidad con Za, SMq y Pa que son clases con características un tanto semejantes (Vega *et al.* 2008). Los píxeles tomados en los límites entre clases generan confusión en las firmas espectrales y en la validación de la clasificación (Fernández *et al.* 2003).

Se clasificaron las imágenes Landsat (1990 y 2000) y Spot (2010) utilizando el método supervisado. La clasificación de las imágenes quedó definida por dos clasificadores rígidos Máxima verosimilitud "MAXLIKE" con una confiabilidad de 99% y Mínimas distancias "MINDIST", ambos utilizaron los mismos campos de entrenamiento generados para cada una de las clases por año. En la clasificación final de cada fecha se utilizó mayormente el resultado de la clasificación generada por MAXLIKE, a excepción de la clase cuerpos de agua (Ca) que fueron obtenidos por MINDIST y agregados a la primera clasificación. Finalmente se realizó una generalización (Rosete *et al.* 2008) de las nueve categorías para eliminar los píxeles aislados con un filtro de mediana 3x3 píxeles.

Se requirió de una edición del polígono del Municipio con ayuda de las imágenes Landsat y el programa ArcView 3.3 a fin de obtener la superficie de 320.6 Km² reportada por INEGI (2003c), el problema estuvo presente en los límites con el Océano Pacífico, este último polígono se empleó para la representación de los mapas. La cartografía obtenida para las imágenes Landsat y Spot, muestra la localización y distribución de las coberturas forestales y usos del suelo en el Municipio de San Pedro Mixtepec, Oaxaca para los años 1990, 2000 y 2010 (Fig. 5, 6 y 7)

7.3. Usos del suelo y coberturas forestales 1990-2010

Las superficies de los usos del suelo y las coberturas forestales para el período 1990-2010 se pueden observar en la Tabla IX. Los resultados indican que en 1990, las coberturas forestales abarcaron una superficie de 23,097.33 ha (72.04%) lo que le da cierto grado de conservación al Municipio. La selva baja caducifolia representa más de la mitad del porcentaje anterior con 19,667.25 ha (61.34%); la clase con menor superficie fue el Manglar. Los usos del suelo agrícola y los pastizales ocuparon una superficie total de 7,828.74 ha (24.42%), por ser las principales actividades productivas de la región (Duran *et al.* 2007). Estas clases determinaron los cambios en las coberturas forestales para este año.

Para el año 2000 las coberturas forestales perdieron una superficie de 2,610.81 ha, resultando más afectadas la selva baja caducifolia con 2,372.4 ha (-7.4%) y el bosque de encino con 110.07 ha (-60% de la superficie inicial). Solo el manglar se incrementó (+8.55 ha) de manera contraria a lo reportado por Guerra & Ochoa (2006), esto se debió a la similitud de sus píxeles con la SMq y Bq, y también por los píxeles que se clasifican en una clase diferente. Las áreas urbanas aumentaron su superficie más del 300% respecto al año inicial, aun así el uso que más influyó en el cambio para este año fueron los pastizales que se incrementaron un 7.49%, ocupando una superficie total de 6,066.18 ha, lo que coincide con García *et al.* (2005). Los cuerpos de agua presentaron un incremento de 13.95 ha. Las clases que perdieron superficie fueron las zonas agrícolas (-208.08 ha) contrario a lo reportado por Ramírez & Zubieta (2005), Duran *et al.* (2007), y las áreas sin vegetación aparente perdieron 15.12 ha.

Tabla IX. Superficies de los usos del suelo y coberturas forestales para el Municipio de San Pedro Mixtepec 1990-2010.

Categoría	1990		2000		2010	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Bq	182.70	0.57	72.63	0.23	56.67	0.18
SMq	3,083.40	9.62	2,946.51	9.19	2,547.07	7.94
SBc	19,667.25	61.34	17,294.85	53.94	15,924.56	49.67
Vm	163.98	0.51	172.53	0.54	169.48	0.53
Pa	3,663.45	11.43	6,066.18	18.92	9,637.58	30.06
Za	4,165.29	12.99	3,957.21	12.34	2,030.84	6.33
Ca	449.64	1.40	463.59	1.45	473.47	1.48
Au	184.59	0.58	601.92	1.88	653.46	2.04
Dv	500.04	1.56	484.92	1.51	567.27	1.77
Total	32,060.34	100.00	32,060.34	100.00	32,060.4	100

Bq= Bosque de encino, SMq= Selva mediana subperennifolia, SBc= Selva baja caducifolia, Vm= Manglar, Pa= Pastizal, Za= Zonas agrícolas, Ca= Cuerpos de agua, Au= Áreas urbanas, Dv= Áreas sin vegetación aparente.

Fuente: Elaboración propia.

Para el 2010 las coberturas forestales habían perdido 7,399.55 ha (-13.72%) de la superficie que ocupaba en el 2000, de las cuales las más afectadas fueron las selvas. En orden de importancia, la disminución se mantuvo con la selva baja caducifolia 1,370.29 ha (-4.2%), la selva mediana subperennifolia 399.44 ha (-1.25%), el bosque de encino 15.96 ha (-0.05%) y el manglar 15.96 ha (-0.01%). Los pastizales tuvieron un mayor incremento, ya que ocuparon el 30.06% de la superficie total del municipio. Las zonas agrícolas tuvieron una disminución de 1,926.37 ha, comparada con el año 2000.

En el período de estudio (1990-2010), las coberturas forestales perdieron un total de 4,400.55 ha (-13.72%) en 20 años, en su mayoría las selvas fueron las más afectadas, semejante a lo obtenido por Cairns *et al.* (2000), García *et al.* (2001) y Duran *et al.* (2007).

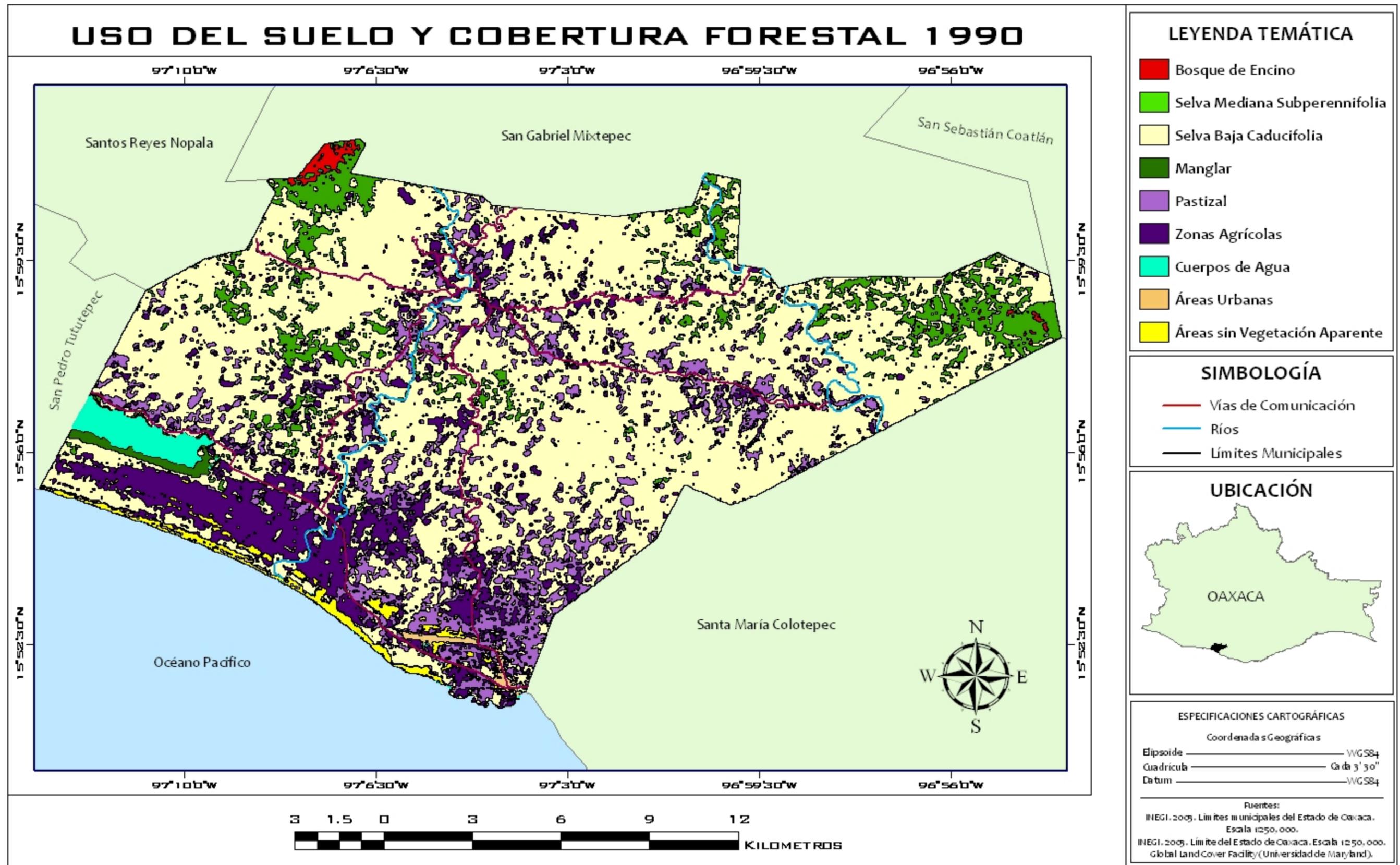


Figura 5. Mapa de uso del suelo y cobertura forestal del área de estudio para el año 1990.

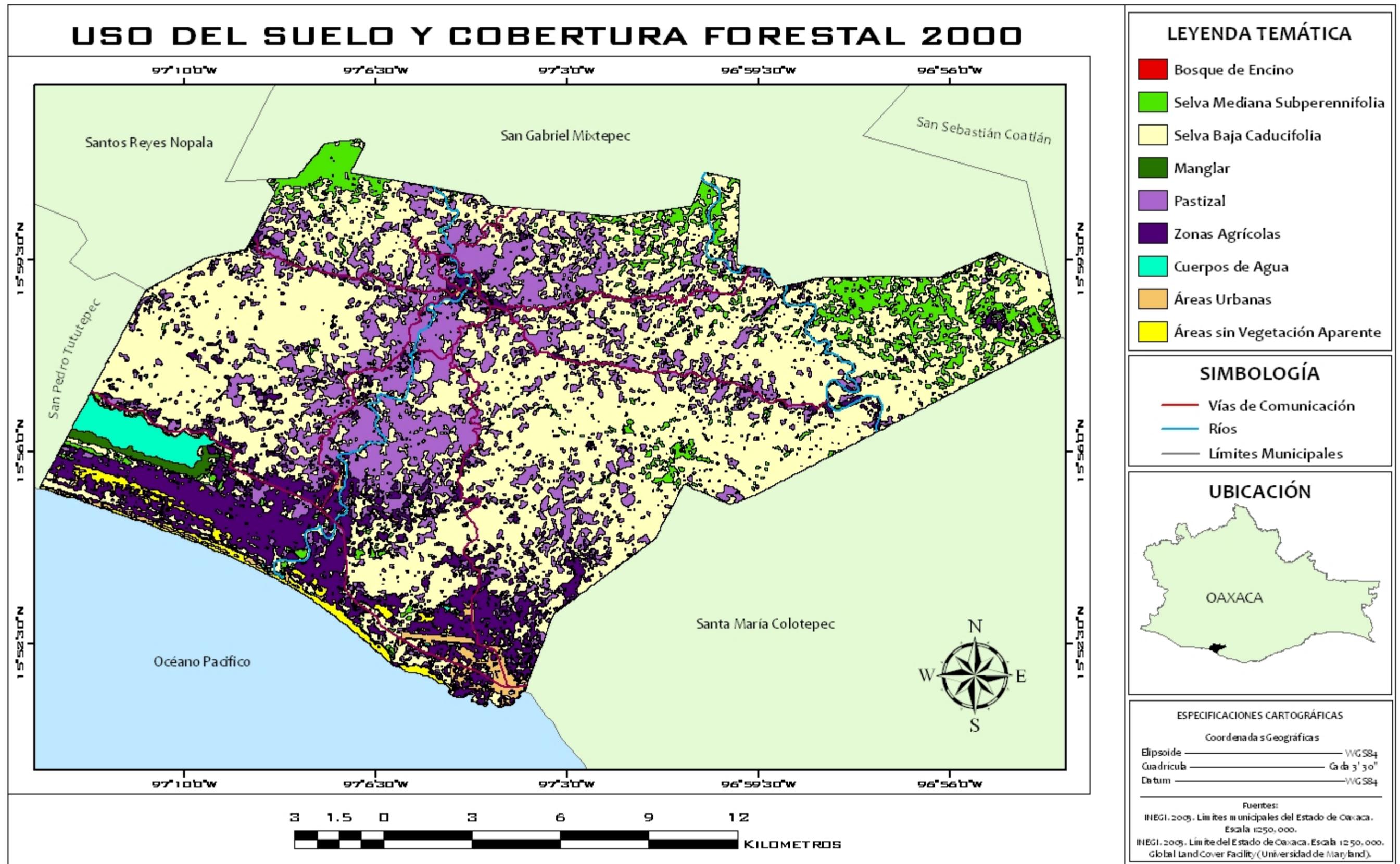


Figura 6. Mapa de uso del suelo y cobertura forestal del área de estudio para el año 2000.

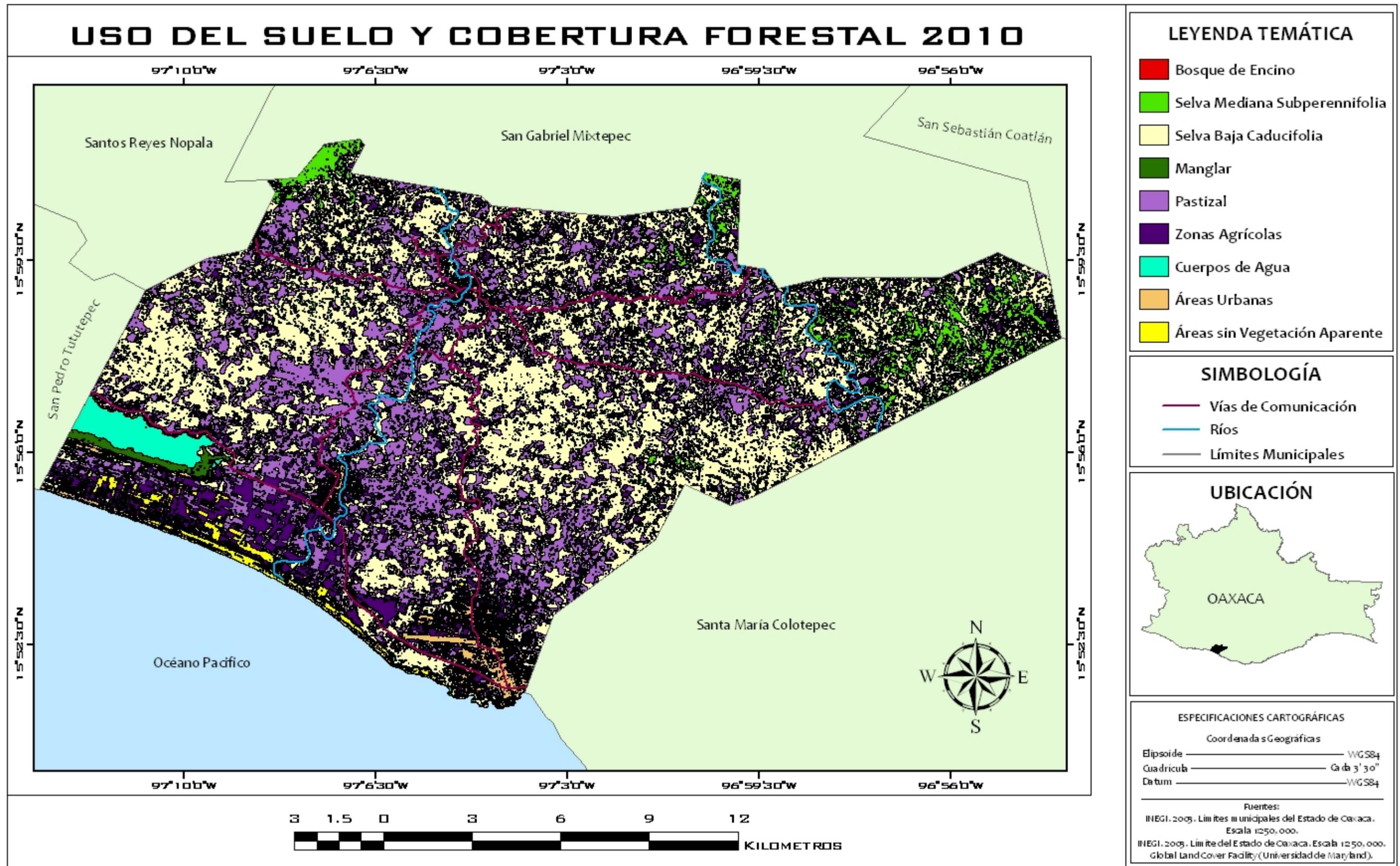


Figura 7. Mapa de uso del suelo y cobertura forestal del área de estudio para el año 2010.

La selva baja caducifolia perdió 3,742.69 ha, resultando la clase más afectada, a pesar de ello cubrió casi la mitad de la superficie del área de estudio (49.67%). La selva mediana subperennifolia se redujo 536.33 ha. El bosque de encino perdió más de la mitad del área que ocupaba en la fecha inicial (126.03 ha), con lo anterior se generó un gran número de parches que dificultara su clasificación en trabajos posteriores, lo que coincide con lo señalado por Bocco (2001) y Cayuela (2006). El mangle fue la única categoría que presentó una tendencia positiva, obteniendo un incremento de 5.5 ha, el aumento en esta categoría coincide con lo obtenido por García *et al.* (2005) y Guerra & Ochoa (2006), pero contrario a lo reportado por Berlanga-Robles & Ruiz-Luna (2007), lo que sugiere que se debe proteger este último y el resto de los ecosistemas por los beneficios que representa cada uno (Sanjurjo & Welsh 2005).

Los usos del suelo en 1990 cubrían una superficie de 8,963 ha (28%) y para el 2010 incrementó a 13,362.62 ha, del 28 al 41.7% respectivamente. Los pastizales fueron los más representativos con 5,974.13 ha (+30.06%), estos determinaron la dinámica del municipio (Ramírez & Zubieta 2005, Franco *et al.* 2006). Las áreas urbanas ganaron 468.87 ha, siendo una de las más dinámicas al aumentar considerablemente su área (Peña *et al.* 2005, Rosete *et al.* 2008), Puerto Escondido fue la población con un mayor crecimiento. Las áreas sin vegetación aparente intercalaron tendencias negativas y positivas, ganando 67.23 ha y ocupó más del 2% del área del municipio. Los cuerpos de agua presentaron una tendencia positiva incrementando 23.83 ha, Ramírez (2001) y García *et al.* (2002) obtuvieron un resultado similar, atribuyéndoselo a los pequeños cuerpos de agua temporal y a la variación pluviométrica. También influyeron los píxeles asignados a los cauce de los ríos, lo que generó un ligero incremento de estos, ya que por lo general se esperaba un decremento como reporta Bocco (2001), Reyes *et al.* (2006),

Berlanga-Robles & Ruiz-Luna (2007). Solo las zonas agrícolas tuvieron una tendencia negativa reduciéndose 2,134.45 ha, más de la mitad del área ocupada en la fecha inicial, debido al desarrollo de otras actividades y al abandono de la tierras de cultivo (López *et al.* 2001, García *et al.* 2002), lo que genera que los agrosistemas sean substituidos por vegetación secundaria (INEGI 2009), aun así las selvas no se vieron favorecidas en su restauración como ocurrió en el estudio de García *et al.* (2005).

Por lo anterior se puede decir que los pastizales y las zonas agrícolas son las actividades que han determinado los cambios en las coberturas forestales del municipio de San Pedro Mixtepec, ejerciendo una gran presión sobre la selva baja caducifolia. Resultado similar a lo reportado en los trabajos de Trejo & Hernández (1996), Bocco *et al.* (2001), López *et al.* (2001) y Sánchez *et al.* (2002).

7.4. Evaluación de la confiabilidad

Como ya se mencionó, en una clasificación existen errores, mismos que afectan la confiabilidad de la información generada, ya sea por características de la información base o por la metodología de la clasificación de las imágenes. La información utilizada como verdadera no es evaluada sino que de manera automática se considera con un 100% de confiabilidad (Mas *et al.* 2003, Mas & Fernández 2003). Este hecho afecta la toma de decisiones efectivas sobre aspectos de particular importancia como es el ordenamiento territorial y estudios de impacto ambiental.

Para la generación de las matrices de error es necesario la toma de puntos de muestreo en la información base y compararlo con la cartografía que se pretende evaluar. Para 1990 y 2000 se establecieron un total de 450 puntos sobre el INF 1994 y el INF 2000 respectivamente. En el caso de 2010 se tomaron en campo 324 puntos, para las clases

con menos de 50 puntos se crearon los puntos restante sobre la imagen de 2010, en el caso de las clases que sobrepasaban los 50 puntos se consideraron como tales, resultando un muestreo de campo con un total de 489 puntos.

En la matriz de confusión las filas representan las clases de referencia y las columnas las clases del mapa. La diagonal representa el número de puntos donde coincide la información de referencia y el mapa, además de señalar la confiabilidad del mapa.

Debido a la falta de información para realizar la evaluación de la clasificación de 1990, se utilizó el Inventario Nacional Forestal de 1994, la Tabla X muestra el resultado de la evaluación, las categorías con mayor confiabilidad fueron los Ca (98%), Dv (98%) y SBc (96%), por ser estas las mejor representadas en la información real y la facilidad que se tuvo al discriminarlas en la imagen de satélite. Con un bajo nivel de confiabilidad fueron las Au (50%), Za (64%) y Pa (78%), debido a errores en la información real tales como: la falta de polígonos para la identificación de Au; el número, tamaño y distribución espacial de los polígonos para las Za y Pa.

Se obtuvo una confiabilidad global de 80.88% y un índice de Kappa de 78%, a pesar de que este último es menor al 80% considerado como mínimo por Jassen & Van der Wel (1994), la clasificación se consideró buena. Lo anterior se debió a factores tales como la diferencia de las fechas de la imagen de satélite (1990) y la información de referencia (1994), la escala (pequeñas comparadas con escalas grandes), las categorías manejadas (poca similitud), la agrupación muy generalizada de los polígonos. Comparado con los estudios realizados por Mas & Ramírez (1996), Mas (1999) y Ramírez & Zubieta (2005), el índice de Kappa obtenido para este año fue aceptable.

Tabla X. Matriz de error de la clasificación de los usos de suelo y cobertura forestal para el año 1990.

Clasificación 1990	Inventario Nacional Forestal 1994											
	Bq	SMq	SBc	Vm	Pa	Za	Ca	Au	Dv	Total	E. U. %	E. C. %
Bq	39	0	0	0	0	0	0	0	0	39	100	0
SMq	9	40	0	0	1	0	1	0	0	51	78	22
SBc	2	8	48	2	10	12	0	7	0	89	54	46
Vm	0	0	0	47	0	0	0	0	0	47	100	0
Pa	0	0	0	0	35	3	0	0	0	38	92	8
Za	0	2	1	0	4	32	0	5	0	44	73	27
Ca	0	0	0	1	0	0	49	0	0	50	98	2
Au	0	0	0	0	0	2	0	25	1	28	89	11
Dv	0	0	1	0	0	1	0	13	49	64	77	23
Total	50	50	50	50	50	50	50	50	50	450		
E. P %	78	80	96	94	70	64	98	50	98			
E. O %	22	20	4	6	30	36	2	50	2			

E. P. = Exactitud del Productor, E. O.= Error de Omisión, E. U.= Exactitud del Usuario, E. C.= Error de Comisión. Bq= Bosque de encino, SMq= Selva mediana subperennifolia, SBc= Selva baja caducifolia, Vm= Manglar, Pa= Pastizal, Za= Zonas agrícolas, Ca= Cuerpos de agua, Au= Áreas urbanas, Dv= Áreas sin vegetación aparente.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla XI muestra el resultado de la evaluación de la clasificación del 2000, la menor confiabilidad estuvo dada por el Bq (60%) y los Pa (76%), dada la dificultad que se tuvo en su discriminación y mezcla que se presentó con otras categorías, el resto de las clases obtuvieron una precisión mayor o igual al 80%. Esto coincide con lo obtenido por Couturier *et al.* (2008) quienes evaluaron la confiabilidad del Inventario Nacional Forestal 2000 aunque de manera parcial, siendo Ca y Au las clases con menor grado de error, para esta fecha presentaron una precisión de 100% y 82%, respectivamente.

La confiabilidad global para este año fue de 84% y un índice de Kappa de 82%, estos valores muestran la correcta discriminación que se hizo de los usos del suelo y coberturas forestales. Este resultado se logró debido a la utilización de imágenes Landsat ETM+ del mismo año, tanto para la clasificación como para la generación del inventario del año 2000, la similitud entre las categorías, mayor número y distribución más uniforme de los

polígonos. Los errores obtenidos se explican en parte por la existencia de píxeles mixtos, ubicados en los bordes de las coberturas seleccionadas y comúnmente en las imágenes Landsat (Speranza & Zerda 2005).

Tabla XI. Matriz de error de la clasificación de los usos de suelo y cobertura forestal para el año 2000.

Clasificación 2000	<i>Inventario Nacional Forestal 2000</i>											E. U. %	E. C. %
	Bq	SMq	SBc	Vm	Pa	Za	Ca	Au	Dv	Total			
Bq	30	0	0	0	0	0	0	0	0	30	100	0	
SMq	7	40	0	1	2	1	0	1	0	52	77	23	
SBc	12	9	45	2	8	5	0	3	2	86	55	45	
Vm	0	0	0	47	0	0	0	0	0	47	100	0	
Pa	0	1	2	0	38	2	0	0	0	43	88	12	
Za	0	0	3	0	2	41	0	5	0	51	80	20	
Ca	0	0	0	0	0	0	50	0	0	50	100	0	
Au	1	0	0	0	0	0	0	41	2	44	93	7	
Dv	0	0	0	0	0	1	0	0	46	47	98	2	
Total	50	50	50	50	50	50	50	50	50	450			
E. P. %	60	80	90	94	76	82	100	82	92				
E. O. %	40	20	10	6	24	18	0	18	8				

E. P. = Exactitud del Productor, E. O.= Error de Omisión, E. U.= Exactitud del Usuario, E. C.= Error de Comisión. Bq= Bosque de encino, SMq= Selva mediana subperennifolia, SBc= Selva baja caducifolia, Vm= Manglar, Pa= Pastizal, Za= Zonas agrícolas, Ca= Cuerpos de agua, Au =Áreas urbanas, Dv= Áreas sin vegetación aparente.

Fuente: Elaboración propia.

La clasificación de 2010 se validó con la información obtenida en campo del mismo año, la Tabla XII muestra la matriz de error resultante. Para esto se consideró un mayor número de puntos de muestra (450) con respecto a los años anteriores. Las categorías con un mayor grado de error fueron el Bq (60%) y la SMq (78%), el primero se mantuvo en el mismo nivel de precisión 2000-2010. Las demás clases alcanzaron una confiabilidad mayor o igual al 80%. La confiabilidad global fue de 84% y el índice de Kappa de 82.3%. Lo anterior, se atribuye a la alta resolución de los píxeles (10 m) de la imagen Spot. Además que la fecha de adquisición de la imagen fue semejante con la fecha de la

información obtenida en campo, por lo tanto se realizó una evaluación con datos representativos de la realidad.

Tabla XII. Matriz de error de la clasificación de los usos de suelo y cobertura forestal para el año 2010.

Clasificación 2010	Muestreo en Campo 2010										E. U. %	E. C. %
	Bq	SMq	SBc	Vm	Pa	Za	Ca	Au	Dv	Total		
Bq	30	1	0	0	0	0	0	0	0	31	97	3
SMq	16	39	2	0	0	0	0	0	0	57	68	32
SBc	4	9	75	2	6	3	0	2	2	103	73	27
Vm	0	0	0	48	0	0	0	0	0	48	100	0
Pa	0	1	5	0	49	6	0	1	0	62	79	21
Za	0	0	1	0	0	40	0	6	1	48	83	17
Ca	0	0	0	0	0	0	50	0	0	50	100	0
Au	0	0	0	0	0	1	0	41	6	48	85	15
Dv	0	0	1	0	0	0	0	0	41	42	98	2
Total	50	50	84	50	55	50	50	50	50	489		
E. P. %	60	78	89	96	89	80	100	82	82			
E. O. %	40	22	11	4	11	20	0	18	18			

E. P. = Exactitud del Productor, E. O.= Error de Omisión, E. U.= Exactitud del Usuario, E. C.= Error de Comisión. Bq= Bosque de encino, SMq= Selva mediana subperennifolia, SBc= Selva baja caducifolia, Vm= Manglar, Pa= Pastizal, Za= Zonas agrícolas, Ca= Cuerpos de agua, Au=Áreas urbanas, Dv= Áreas sin vegetación aparente.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede notar que conforme más reciente es la fecha de las imágenes, la confiabilidad aumenta como lo obtuvieron Bocco *et al.* (2001), Berlanga-Robles & Ruiz-Luna (2007) y Vega *et al.* (2008), y obtener así valores de precisión por encima del 80%. El 100% de confiabilidad de Ca es justificable, considerando que visualmente es la categoría de mayor facilidad al discriminarse en las imágenes y estar bien representada en la información de referencia, caso similar ocurrió con el Vm, SBc y Au. Otro aspecto de importancia es la relación que existe entre el tamaño de las clases y el error en la clasificación, entre más pequeña es la superficie de una categoría mayor es el error que se tiene al clasificarla (Rincón 2003).

Considerando la clase de selva baja caducifolia (SBc) en la matriz de error de 2010, la exactitud del usuario fue de 73%, se refiere a que existe tal probabilidad de que el usuario localice en el mundo real SBc en ese sitio. La exactitud del productor de la misma clase fue de 89% y se refiere a que existe tal probabilidad de clasificar correctamente dicha categoría.

7.5. Tasa de cambio

Las tasas de cambio por período y categoría se muestran en la Tabla XIII. Para el primer período (1990-2000), las coberturas forestales tuvieron una tasa de -1.19%, lo que significó una reducción de estas. Con una tasa de -8.81% el Bq fue la categoría más afectada, ya que disminuyó casi dos tercios de su área original (-110.07 ha). La SBc presentó la mayor tasa negativa -1.28%, perdiendo 2,509.29 ha. La tasa más pequeña la obtuvo la SMq (-0.4%). El Vm fue la única categoría que presentó una tasa positiva de 0.51% (8.55 ha), cuando se esperaba lo contrario de acuerdo con García *et al.* (2005) y Berlanga-Robles & Ruiz-Luna (2007). Los usos del suelo alcanzaron una tasa de 2.59%, lo que se reflejó en un incremento de la superficie de estas clases. La mayor tasa la presentó Au con +12.55% ganando 417.33 ha, seguido por los pastizales con +5.17% aumentando 2,402.73 ha). Los Ca que se esperaba disminuyeran (Peña-Cortés 2006) se vieron favorecidos por su tasa de cambio positiva 0.31%. Las tasas negativas fueron presentadas por Za (-0.51%) perdiendo 208.08 ha y Dv con una tasa de -0.31%, en 1990 fueron usos de importancia en el municipio por la superficie que ocuparon.

Para el período 2000-2010 la tasa de cambio anual promedio para las coberturas forestales fue de -4.9%, mayor al período anterior. El Bq continuó reduciéndose en su área a razón de una tasa de -2.45% y manteniéndose como la tasa más alta, le sigue SMq con una tasa de -1.45% (-399.44 ha), mayor a la obtenida el período anterior, la SBc

con la tasa de -0.82% se redujo 1,370.29 ha, superficie menor al período anterior. En esta ocasión el Vm con una tasa de -0.18% se vio reducido en 3.05 ha. Los usos del suelo tuvieron una tasa promedio de 0.9%, resultando los pastizales con la mayor tasa de cambio 4.74% (3,571.4 ha), el resto de los usos tuvieron un incremento pequeño comparado con el período anterior. Lo que resulta importante es la notable reducción de Za con una tasa de cambio de -6.45% (-1,926.37 ha).

Tabla XIII. Tasas de cambio de los usos del suelo y coberturas forestales en el Municipio de San Pedro Mixtepec.

Categorías	1990-2000 %/año	2000-2010 %/año	1990-2010 %/año
Bosque de encino	-8.81	-2.45	-5.69
Selva mediana subperennifolia	-0.45	-1.45	-0.95
Selva baja caducifolia	-1.28	-0.82	-1.05
Manglar	0.51	-0.18	0.17
<i>Tasa General de las Coberturas forestales</i>	<i>-1.19</i>	<i>-0.91</i>	<i>-1.05</i>
Pastizales	5.17	4.74	4.96
Zonas agrícolas	-0.51	-6.45	-3.53
Cuerpos de agua	0.31	0.21	0.26
Áreas urbanas	12.55	0.82	6.52
Áreas sin vegetación aparente	-0.31	1.58	0.63
<i>Tasa General de los Usos del suelo</i>	<i>2.59</i>	<i>1.45</i>	<i>2.02</i>

Fuente: Elaboración propia.

Para el período 1990-2010, el bosque de encino tuvo la mayor tasa de cambio -5.69%, seguido de la selva baja caducifolia con -1.05%. En términos de pérdida de superficie esta última resultó ser la cobertura que más presión ha tenido por parte de los usos del suelo. El manglar presentó una tasa de 0.17%, fue un incremento mínimo que se puede explicar por la diferencia de la resolución del material utilizado y al error que se tuvo al clasificar las imágenes, mismo que se puede observar a través de las firmas espectrales.

Con respecto a los usos del suelo las tasas mayores la presentaron las áreas urbanas y los pastizales con una tasa de 6.52% y 4.96%, respectivamente. A pesar de haberse

incrementado más del 300% las áreas urbanas, no resultaron tan importantes como lo fueron los pastizales (Díaz-Gallegos *et al.* 2008, Rosete *et al.* 2008), debido a que estos últimos tuvieron mayor presencia (9,637.58 ha). Los cuerpos de agua presentaron una tasa de cambio positiva (0.26%) coincidiendo con García *et al.* (2005) y Ramírez (2001), aun que se esperaba una disminución (Bocco *et al.* 2001, Ramírez & Zubieta 2005), esto se debió en parte al desplazamiento de los límites del mar hacia las playas (Cupul *et al.* 2004) y el comportamiento pluviométrico ocurrido en la fecha de la toma de las imágenes de cada año analizado (Miranda-Aragón *et al.* 2009). Con una tasa de -3.53% las zonas agrícolas disminuyeron considerablemente, contrario a lo encontrado por Reyes *et al.* (2006) y Nájera *et al.* (2010). Al no ser tan redituable esta actividad los campesinos emigran a las ciudades de México o a los Estados Unidos (Carrasco 1999), pero esto no se reflejó en la recuperación de las coberturas forestales debido al aumento de los pastizales (Franco *et al.* 2006). En el caso del municipio de San Pedro la mayoría de los agricultores después de cultivar un terreno siembran pastos, lo cual favorece la transición de uso agrícola a pastizal, como lo reportan Paruelo *et al.* (2005) y Castelán *et al.* (2007). Por ello la degradación de las selvas fue inducida por los pastizales y las zonas agrícolas, estas actividades también determinaron la dinámica de los trabajos de Sánchez *et al.* (2002), Salazar *et al.* (2004) y Ramos & Rodríguez (2010).

La tasa de cambio general para el período analizado fue de -1.05% anual, lo que representa una pérdida anual de 220 ha. Esto refleja la alta velocidad a la que se dan los cambios en el municipio, que es mayor a la reportada por Velázquez *et al.* (2002), Duran *et al.* (2007), Miranda-Aragón *et al.* (2009) y menor a la reportada por la FAO (2002) y Rincón (2003).

7.6. Transición de clases en el tiempo

Como resultado de la tabulación cruzada entre los mapas de 1990 y 2010 se obtuvo la matriz de transición correspondiente (Tabla XIV), esta es de gran utilidad para el análisis de los cambios que se dan entre las clases. Las cantidades en negritas representan los falsos cambios, debido a que tal cambio entre clases no puede ocurrir, tal es el caso del Bosque de encino no puede pasar a Manglar, el total de los falsos cambios apenas rebasa el 1% del total, por lo cual no se consideran importantes (Velázquez *et al.* 2002).

En el Municipio de San Pedro Mixtepec durante el período de 1990-2010, solo el 47.1% del territorio permaneció sin cambio alguno (equivalente a 15,100.42 ha), por lo tanto no existe recuperación de las coberturas forestales, debido a la escasa transición de usos antrópicos hacia las coberturas, coincidiendo con Bocco *et al.* (2001). Las transiciones de las coberturas se dio principalmente hacia las actividades agropecuarias, coincidiendo con Rosete *et al.* (2008). Solo el manglar tuvo un incremento en su superficie, quizás debido a que es un ecosistema que se encuentra protegido, lo cual lo favorece. La clase más afectada fue la selva baja caducifolia, debido a los pastizales y las zonas agrícolas, estos son muy dinámicos coincidiendo con Bocco *et al.* (2001) y Guerra & Ochoa (2006). Los cuerpos de agua presentaron un cambio positivo al incrementarse.

Los usos del suelo tuvieron un incremento, abarcando el 61.2% de las ganancias. Las zonas agrícolas experimentan ganancias, pero lo cierto es que se han reducido coincidiendo con lo reportado por Plata *et al.* (2009), la superficie ocupada en 1990 ha pasado mayormente a pastizales y selva baja caducifolia, a pesar de esto no hubo restauración de las coberturas forestales.

Tabla XIV. Matriz de transición de uso del suelo y cobertura forestal del Municipio de San Pedro Mixtepec 1990-2010.

Clasificación 1990	Clasificación 2010									Total 1990	Pérdidas
	Bq	SMq	SBC	Vm	Pa	Za	Ca	Au	Dv		
Bq	42	1512	435	8	17	9	0	0	0	2023	1981
SMq	348	8704	18031	92	5966	1063	9	27	13	34253	25549
SBC	205	16958	124378	380	64467	9232	193	1764	916	218493	94115
Vm	0	3	255	1476	3	0	83	2	0	1822	346
Pa	2	635	17395	0	17828	3371	0	1229	241	40701	22873
Za	4	457	14659	21	18511	7799	38	1962	2827	46278	38479
Ca	1	1	63	85	6	1	4810	4	16	4987	177
Au	0	5	656	1	100	125	24	871	268	2050	1179
Dv	0	4	815	0	309	995	109	1277	2034	5543	3509
Total 2010	602	28279	176687	2063	107207	22595	5266	7136	6315	356150	188208
Ganancias	560	19575	52309	587	89379	14796	456	6265	4281	188208	

Bq= Bosque de encino, SMq= Selva mediana subperennifolia, SBC= Selva baja caducifolia, Vm =Manglar, Pa= Pastizal, Za= Zonas agrícolas, Ca= Cuerpos de agua, Au= Áreas urbanas, Dv= Áreas sin vegetación aparente.

Fuente: Elaboración propia.

VIII. Conclusiones

Los usos del suelo y las coberturas forestales identificadas en el presente trabajo comprenden nueve categorías estas son: bosque de encino (Bq), selva mediana subperennifolia (SMq), selva baja caducifolia (SBc), manglar (Vm), pastizal (Pa), zonas agrícolas (Za), cuerpos de agua (Ca), áreas urbanas (Au) y áreas sin vegetación aparente (Dv), para la cartografía de cada año analizado.

Las coberturas forestales presentaron una sobreposición en sus firmas espectrales, debido a la similitud de sus niveles digitales, color y textura, y la presencia de follaje. De acuerdo al análisis de separabilidad espectral, las categorías identificadas en las tres fechas (1990, 2000 y 2010) se encuentran dentro del intervalo más alto de separabilidad (1,900-2,000), por lo tanto se considera buena la discriminación de cada clase.

La pérdida de superficie forestal se debió al cambio de uso de suelo para el establecimiento de pastizales, zonas agrícolas y áreas urbanas, estas han sido las más dinámicas de 1990-2010. El impacto de estas actividades se presenta de manera más alarmante en la selva baja caducifolia.

De 1990 a 2010 las zonas urbanas se incrementaron un 300% (469 ha) comparado con la fecha inicial, mayormente en la ciudad de Puerto Escondido. En términos de superficie el mayor incremento lo tuvieron los pastizales con 5,974 ha. Las zonas agrícolas se vieron reducidas en su superficie, esto quizás se debe al desarrollo de otra actividad productiva, el abandono de tierras y la migración hacia las grandes ciudades del país o Estados Unidos. Sin embargo, a pesar de la disminución de las zonas agrícolas no hubo recuperación de las coberturas.

A pesar de que la clasificación de las imágenes depende de factores como la identificación de los elementos en la imagen por el intérprete, las texturas, los valores de reflectancia, tono, color y los métodos utilizados, los resultados obtenidos en este trabajo indican una buena aproximación de la realidad y representan un avance en relación a la problemática que se presenta en San Pedro Mixtepec.

La tasa de cambio global para el municipio de San Pedro Mixtepec fue de -1.05%, lo que representa una pérdida de 220 ha/año. La cobertura más afectada fue la selva baja caducifolia, la cual pierde 187.1 ha/año. Solo el manglar mantuvo su cobertura estable durante este período de estudio.

El 47.1% del territorio permaneció sin cambio alguno, por lo tanto no hubo recuperación de las coberturas forestales por las actividades agropecuarias. La superficie de la selva baja caducifolia, pasó principalmente a pastizales y zonas agrícolas. Los usos del suelo tuvieron un incremento en superficie, abarcando el 61.2% de las ganancias.

Los resultados validan la hipótesis formulada, ya que en San Pedro Mixtepec los cambios pasan de forestal a uso agrícola, posteriormente de uso agrícola a ganadero, por lo general no se da la conversión directa de forestal a ganadero.

De manera general se concluye que el municipio de San Pedro Mixtepec presenta un grave problema de pérdida de su cobertura forestal ocasionado por acciones antrópicas. Ante esto, es necesario realizar estudios de planeación y ordenamiento territorial que permitan una planificación adecuada para el desarrollo económico y social basado en el uso sustentable de los recursos naturales.

IX. Recomendaciones

Al realizar un estudio multitemporal de uso de suelo, es importante que las imágenes sean del mismo sensor y las fechas de captura de estas sean lo más semejantes posible, de tal manera que se facilite su clasificación y las categorías identificadas sean similares.

Para obtener altos valores de confiabilidad, es recomendable validar con cartografía que maneje las mismas categorías de uso de suelo obtenidas en las clasificaciones de las imágenes. Se recomienda realizar un muestreo en campo para validar la imagen más reciente y no utilizar información real a escalas pequeñas que provocarían errores.

Manejar la información geográfica (raster y vectores) en un solo tipo de coordenadas, datum y elipsoide. Esto para facilitar la sobreposición de datos y evitar errores de desplazamientos.

En estudios posteriores relacionados a este tema se deben considerar los aspectos económicos y sociales, a fin de correlacionar las causas que originan estos cambios de uso de suelo.

Dado que en el municipio el cambio de uso de suelo se da principalmente por las actividades agropecuarias, se recomienda realizar estudios enfocados al uso potencial del suelo. Es decir, de acuerdo a las características del suelo (tipo, topografía y exposición en la que se encuentran), determinar si es apropiado para el desarrollo de las actividades que actualmente se practican o es necesario reconvertir a actividades para las que son los suelos aptos.

Por la acelerada tasa de cambio en el municipio, es importante involucrar a los productores agrícolas y ganaderos en la implementación de alternativas para el aprovechamiento sustentable de sus recursos, a través del uso de buenas prácticas para

conservar el suelo y el agua así como la preservación del germoplasma nativo y la biodiversidad, mediante plantaciones forestales multipropósito como comerciales, maderables, agroforestales, de restauración y energéticos.

El cambio de uso del suelo afecta a las comunidades no maderables que tienen valor económico por lo que se recomienda que una vez ubicadas y viendo su vulnerabilidad se realicen investigaciones para proponer programas de manejo que garanticen su permanencia.

Presentar los resultados obtenidos a las autoridades municipales de San Pedro Mixtepec, y con base en ello buscar posibles soluciones al respecto. Con la información generada en este trabajo actualizar los datos del Plan Municipal de Desarrollo para el municipio.

X. Literatura Citada

- Alfaro, Sánchez G. 2004. Suelos. Pp: 55-65 *In*: García-Mendoza, A. J., M. J. Ordoñez & M. Briones-Salas (eds.), Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund, México.
- Arancibia, María Ester. 2008. El uso de los sistemas de información geográfica (SIG) en la planificación estratégica de los recursos energéticos. *Revista Polis* 7(20):227-238.
- Arango, Gutiérrez M., J. W. Branch Bedoya & V. Botero Fernández. 2005. Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: Landsat-ETM+. *Rev. Fac. Agr. Medellín* 58(1):2611-2634.
- Ávila, S. H. 2008. Cambios y recomposiciones territoriales. Las regiones de México en la globalización. *Scripta Nova*. 12(270). Consultado el 26 de junio de 2009: www.ub.es/geocrit/sn/sn-270/sn-270-17.htm
- Berlanga-Robles, C.A & A. Ruiz-Luna. 2007. Análisis de las tendencias de cambio del bosque de mangle del sistema lagunar Teacapán-agua Brava, México. Una aproximación con el uso de imágenes de satélite Landsat. *Universidad y Ciencia* 23(1):29-46.
- Berlanga-Robles, C. A. & A. Ruiz-Luna. 2006. Evaluación de cambios en el paisaje y sus efectos sobre los humedales costeros del sistema estuarino de San Blas, Nayarit (México) por medio de análisis de imágenes Landsat. *Ciencias Marinas* 32(3):523-538.
- Bocco, G. M., J. L. Palacio & C. A. Valenzuela. 1991. Integración de la percepción remota y los sistemas de información geográfica *In*: Rosete & Bocco. Los sistemas de

- información geográfica (SIG) y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. *Gaceta Ecológica* (68):43-54.
- Bocco, G., M. Mendoza & O. R. Masera. 2001. Dinámica del cambio de uso del suelo en Michoacán. Propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas* (44):18-38.
- Cairns, A. M., P. K. Haggerty, R. Álvarez, B. H. J. De Jong & Ingrid Olmsted. 2000. Tropical Mexico's recent land-use change: a region's contribution to the global carbon cycle. *Ecological Applications*, 10(5):1426-1444.
- Camara, G., R. C. M. Souza, U. M. Freitas & J. Garrido. 1996. SPRING, Integrating remote sensing and GIS by object oriented data modeling *In: Moizo, Rubio Paul. La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en la ecología de paisaje. GeoFocus* (4):1-24.
- Carnevale, N. j., C. Alzugaray & N. Di Leo. 2007. Estudio de la deforestación en la cuña boscosa Santafesina mediante teledetección espacial. *Quebracho* (14):47-56.
- Carrasco, Tania. 1999. Los productores del campo en Oaxaca. *Ateridades* 9(17):95-104.
- Castelán, Vega R., J. Ruiz Careaga, G. Linares Fleites, R. Pérez Avilés & V. Tamariz Flores. 2007. Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del Río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas* (64):75-89.
- Cayuela, L. 2006. Reforestación y fragmentación de los bosques tropicales montanos en los altos de Chiapas, México. Efectos de sobre la diversidad de árboles. *Ecosistemas* 15(3):192-198.

- Centro Regional Universitario Sur-UACH. 2008. El ensilaje, alternativa para la conservación de forrajes para regiones ganaderas de Oaxaca. *Agroproduce* (26):30-31.
- Challenger, A., R. Dirzo, J. C. López, A. Lira-Noriega, I. Cruz & E. Mendoza. 2009. Factores de cambio y estado de la biodiversidad, en capital natural de México, Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO, México. Pp. 37-73.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 1998. Cuencas hidrológicas. Escala 1:250,000. México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2005. Percepción remota “fundamentos de teledetección espacial”. Recopiló: Ing. Julio Martínez Muñoz. Reviso: Goeg. Alejandro Díaz Ponce. 62 pp. Consultado el 20 de mayo de 2010: <http://siga.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20espacial.PDF>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Consultado el 20 de enero de 2010: www.conafor.gob.mx/
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1999. Uso del suelo y vegetación de INEGI modificado por CONABIO. Escala 1:1,000,000. CONABIO, México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2000. Estrategia nacional sobre la biodiversidad de México. CONABIO, México, 103 pp.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2008. Manglares de México. CONABIO, México, 35 pp.

- Coronado, Chacón Luis. 2001. Comprobación de técnicas de procesamiento de imágenes del sensor remoto ETM+ de Landsat 7, en la identificación de Bosques Secundarios en la Región Huetar Norte de Costa Rica. Informe de práctica de especialidad. Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Congalton, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data *In*: Mas, J-F., J. R. Díaz-Gallegos & A. Pérez. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. 2003. *Investigaciones Geográficas* (51):53-72.
- Congalton, G. R. 2005. Thematic and positional accuracy assessment of digital remotely sensed data. *Proceedings of the seventh annual forest inventory and analysis symposium*. 149-154.
- Cortina, V. S., P. Macario M. & Y. Ogneva H. 1999. Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México. *Investigaciones Geograficas* (38):41-56.
- Couturier, S., A. Vega, J-F. Mas, V. Tapia & E. López-Granados. 2008. Evaluación de la confiabilidad del mapa del Inventario Forestal Nacional 2000: diseños de muestreo y caracterización difusa de paisajes. *Investigaciones Geográficas* (67):20-38.
- Cupul, Magaña L. A., A. L. Cupul Magaña, F. J. Núñez Cornú & E. Gil Silva. 2004. El evento erosivo de la playa de mismoloya, Jalisco, México. *Ciencias Marinas* 30(3):417-425.

- Dewan, A. M. & Y. Yamaguchi. 2009. Using remote sensing and GIS to detect and monitor land use and land cover change in Dhaka Metropolitan of Bangladesh during 1960-2005. *Env. Mon. Ass.* (150):237-249.
- D.O.F. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación. 30 de diciembre 2010, México D.F.
- Díaz-Gallegos J. R., J-F. Mas & A. Velázquez Montes. 2008. Monitoreo de los patrones de deforestación en el Corredor Biológico Mesoamericano, México. *Interiencia* 33(12):882-890.
- Díaz, Varela. R. A., P. Ramil, S. Calvo & C. Muñoz. 2008. Automatic habitat classification methods based on satellite images: A practical assessment in the NW Iberia coastal mountains. *Env. Mon. Ass.* (144):229-250.
- Dukatz, F., R. Ferrati & G. Canziani. 2005. Clasificación de lagos someros pampeanos mediante imágenes Landsat TM. *Biología Acuática* (22):95-101.
- Dupuy, J. M., J. González, S. Iriarte, L. M. Calvo, C. Espadas, F. Tun Dzul & A. Dorantes. 2007. Cambios de cobertura y uso del suelo (1979-2000) en dos comunidades rurales en el noroeste de Quintana Roo. *Investigaciones Geográficas* (62):104-124.
- Duran, E., F. Gopar, A. Velázquez, F. López, A. Larrazábal & C. Medina. 2007. Análisis de cambio en las coberturas de vegetación y usos del suelo en Oaxaca. II Simposio de Biodiversidad de Oaxaca. Oaxaca, México. 27 al 25 de abril.
- Eastman, J. R. 2003. *IDRISI Kilimanjaro, Guide to GIS and Image Processing*. Clark Lab. Clark University, 290 pp.

- Fearnside, M. P. 2001. Saving tropical forest as a global warming countermeasure: an issue that divides the environmental movement. *Ecological Economics* (39):167-184.
- Fernández, Sarría A., J. Recio Recio & L. A. Ruiz Fernández. 2003. Análisis de imágenes mediante texturas: aplicación a la clasificación de unidades de vegetación. *GeoFocus* (3):143-159.
- Figueroa-Jáuregui, M. L., L. A. Ibáñez-Castillo, R. Arteaga-Ramírez, J. L. Arellano-Monterrosas & M. Vázquez-Peña. 2011. Cambio de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. *Agrociencia* (45):531-544.
- Flores-López, Francisco J. & Scott Christopher A. 2000. Superficie agrícola estimada mediante análisis de imágenes de satélite en Guanajuato, México. IWMI, Serie Latinoamericana No. 15. México, D.F., México: Instituto Internacional del Manejo del Agua.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1996. Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change process (130), 152 pp.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2001. Global Forest Resources Assessment 2000 (140), 479 pp.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2002. State of the World Forest 2001, 181 pp.
- Foody, M. G. 2004. Thematic map comparison: Evaluating the statistical significance of differences in classification accuracy. *Phot. Eng. Rem. Sen.* 70(5):627-633.

- Franco, S., H. Regil & J. A. Ordoñez. 2006. Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Madera y Bosques* 12(01):17-28.
- Frau, M. C., J. R. Santos, F. D. Maldonado, J. G. Valenzuela, M. M. Valeriano, Y. O. Rojas & Y. M. Hernández. 2010. Caracterización y monitoreo de paisaje semiárida en la Región del Maule mediante datos satelitales. *Rev. Bra. de Eng. Agri. e Amb.* 14(6):660-668.
- García, Gil G., I. March M. & M. A. Castillo Santiago. 2001. Transformación de la vegetación por cambio de uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche. *Investigaciones Geográficas* (46):45-57.
- García, Nieto H., R. García, R. Moreno & A. González. 2002. Uso de sensores remotos y SIG para delimitar los cambios en el uso del suelo agrícola de 1970 a 1997 en el Estado de Guanajuato. *Investigaciones Geográficas* (47):92-112.
- García-Mendoza, A. J., M. de Jesús & M. Briones-Salas. 2004. Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund, México, 605 pp.
- García, M. T. J. & J.F. Mas. 2008. Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones Geográficas* (67):7-19.
- García, R. G., B. Schmook & LL. Espejel. 2005. Dinámica del uso del suelo en tres ejidos cercanos a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. *Investigaciones Geográficas* (58):122-139.

Global Land Cover Facility de la Universidad de Maryland. Consultado el 28 de marzo de 2009: glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml

Gómez, Delgado M. & J. I. Barredo Cano. 2005. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. ALFA OMEGA Grupo Editor. México, 279 pp.

Gómez-Díaz, J. D., A. I. Monterroso-Rivas, J. A. Tinoco-Rueda & J. López-García. 2007. Comportamiento de la vegetación bajo escenarios de cambio climático en la reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México. *Zonas Áridas* 11(1):61-69.

González, Cueto O., C. E. Iglesias Coronel & M. Herrera Suarez. 2009. Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Rev. Cien. Tec. Agro.* 18(2):57-63.

Greenpeace. 2009. La destrucción de México. La realidad ambiental del país y el cambio climático. Aleira Lara, Alejandro Olivera, Beatriz Olivera, Cecilia Navarro, Héctor Magallón, Julián Santamaría, María Cárdenas, Paloma Neumann, Patricia Ramos. Greenpeace México. 15 pp.

Guerra, M. V & Ochoa. 2006. Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la reserva de la biosfera pantanos de cetlan, Tabasco (1990-2000). *Investigaciones Geográficas* (59):7-25.

Gutiérrez, J. & H. Jegat. 2005. Uso de la teoría de lógica difusa en la clasificación de imágenes satelitales con coberturas mixtas: el caso urbano de Mérida, Venezuela. *Interciencia* 30(5):261-266.

Hernández, Gómez I.U., E. A. Ellis & C. A. Gallo-Gómez. 2011. Deforestación y deterioro de las selvas tropicales de la región Uxpanapa, Veracruz. XIII Conferencia Iberoamericana en Sistemas de Información Geográfica. Ciudad de Toluca, Estado de México, México. 25 al 27 de Mayo. Consultado el 28 de noviembre de 2010: <http://www.caece.edu.ar/tea/Apuntes/landsat-analisis-visual.pdf>

Hernández, Vargas G., L. R. Sánchez Velásquez, T. F. Carmona Valdovinos, Ma. Pineda López & R. Cuevas Guzmán. 2000. Efecto de la ganadería extensiva sobre la regeneración arbórea de los bosques de la Sierra de Manantlan. *Madera y Bosques* 6(2):13-28.

Hudson, W. D. & C. W. Ramn. 1987. Correct formulation of kappa coefficient of agreement *In: Speranza, F. C. & H. R. Zerda. Clasificación digital de coberturas vegetales a partir de datos satelitales multiespectrales. Consultado el 18 de marzo de 2010:www.inta.gov.ar/manfredi/info/boletines/areasuelos/cober_veg_satel_multi.pdf*

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1989. Carta edafológica Puerto Escondido D14-3. Escala 1:250,000. México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1990. Guías para la interpretación de cartografía uso del suelo, 46 pp.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) - Instituto Nacional de Ecología (INE). 1996. Uso del suelo y vegetación. Agrupado por CONABIO. 1998. Escala 1:1,000,000. México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1999. Ortofotos digitales: D14B16b, D14B16c, D14B16f, D14B17a. Fotografías aéreas escala 1:75,000 de diciembre de 1999.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2002a. Carta de climas. Tipos de climas según Köppen modificados por García E. Escala 1:1,000,000. México.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2002b. Carta de regionalización fisiográfica. Escala 1:1,000,000. México.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2002c. Carta de precipitación total anual. Escala 1:1,000,000. México.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2002d. Carta de temperatura media anual. Escala 1:1,000,000. México.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2002e. Carta edafológica. Escala 1:1,000,000. México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2003a. Carta topográfica D14B16, D14B17, E14D86, E14D87. Escala 1:50,000. México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2003b. Límites del estado de Oaxaca, Escala 1:250,000. Extraído de Conjunto de Datos Vectoriales y Toponimias de la carta Topográfica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2003c. Límites municipales del estado de Oaxaca, Escala 1:250,000. Extraído de Conjunto de Datos

- Vectoriales y Toponimias de la carta Topográfica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2004a. Guía para la interpretación de cartografía edafológica, México, 28 pp.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2004b. Síntesis geográfica del Estado de Oaxaca, México, 395 pp.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. Guía para la interpretación de la cartografía uso del suelo y vegetación, México, 96 pp.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2009. Anuario estadístico Oaxaca. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Gobierno del Estado de Oaxaca-México, 1349 pp.
- IUSS Working Group WRB. 2007. World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007. World Soil Resources Report No. 103. FAO, Rome, 116 pp.
- Janssen, L. L. F. & F. J. M. Van der Wel . 1994. Accuracy assessment of satellite derived land-cover data: a review. *Phot. Eng. Rem. Sen.* 60(4):419-426.
- Jensen, J. R. 1996. Introductory digital image processing. A remote sensing perspective
In: Díaz, Varela R. A., P. Ramil, S. Calvo & C. Muñoz. Automatic habitat classification methods based on satellite images: A practical assessment in the NW Iberia coastal mountains. Env. Mon. Ass. (144):229-250.
- Lambin, E. F. (1997). Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Prog. in Phy. Geo.* 31(3):375-393.

- Lambin, E. F., B. L. Turner, J. Helmut, S. B. Geist, S.B. Agbola, A. Arild, J.W. Bruce, O.T. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P.S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E. F. Moran, M. Mortimore, P.S. Ramakrishnan, J.F. Richards, H. Skanes, W. Steffen, G.D. Stone, U. Svedin, T. Veldkamp. A. Vogel & C. J. Xu. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Glo. Env. Cha.* (11):261-269.
- Lizano, G. O., J. Amador & R. Soto. 2001. Caracterización de manglares de Centroamérica con sensores remotos. *Rev. de Bio. Trop.* (2):331-340.
- López, E., G. Bocco & M. Mendoza. 2001. Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia. *Investigaciones Geográficas* (45):56-76.
- López, Vázquez V. H. & W. Plata-Rocha. 2008. Análisis de los cambios de cobertura del suelo derivados de la expansión urbana de la zona metropolitana de la zona de México, 1990-2000. *Investigaciones Geográficas* (68):85-101.
- Márquez, R. I., B. de Jong, A. Eastmond, S. Ochoa Gaona, S. Hernández & M. D. Kantún. 2005. Estrategias productivas campesinas: un análisis de los factores condicionantes del uso del suelo en el oriente de tabasco, México. *Universidad y Ciencia* 21(42):57-73.
- Mas, J-F. 1999. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *Int. Jou. Rem. Sen.* 20(1):139-152.
- Mas, J-F., J. R. Díaz-Gallegos & A. Pérez Vega. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas* (51):53-72.

- Mas, J-F., A. Velázquez, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, C. Alcántara, G. Bocco, R. Castro, T. Fernández & A. Pérez-Vega. 2004. Assessing land use/cover changes: a nationwide multidecadate spatial database for México. *Inter. Jou. App. Ear. Obs. Geo.* (5):249-261.
- Mas, J. F., A. Velázquez, J. R. Díaz, R. Mayorga, C. Alcántara, R. Castro & T. Fernández. 2004. Assessing land use/cover changes in México. Instituto de Geografía, UNAM. 29th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE). Buenos Aires, Argentina.
- Mas, J-F., A. Velázquez & Stéphane Couturier. 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo de la república mexicana. *Investigación Ambiental* 1(1):23-39.
- Mas, Jean-Francois. 2006. Actualización del mapa de uso del suelo, vegetación y hábitats críticos y elaboración de una base cartográfica digital del área protegida de Laguna de Términos. Universidad Autónoma de Campeche e Instituto de Geografía-UNAM. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. N011 México D.F.
- Mas, Jean-Francois & I. Ramírez. 1996. Comparison of land use classifications obtained by visual interpretation and digital processing. *ITC Journal* 3(4):278-283.
- Miranda-Aragón, L., L. A. Ibáñez-Castillo, J. R. Valdez-Lazalde & P. Hernández-de la Rosa. 2009. Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de período de retorno del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios de uso de suelo. *Agrocienca* (43):333-344.
- Moreira, Muñoz Andrés. 1996. Los sistemas de información geográfica y sus aplicaciones en la conservación de la biodiversidad biológica. *Ciencia y Arte*. 7(2):80-86.

Nájera, González O., J. L. Bojórquez Serrano, J. L. Cifuentes Lemus & Marcelleño Flores. 2010. Cambios de cobertura y uso del suelo en la cuenca del Río Mololoa, Nayarit. *Biociencias* 1(1):19-29.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). Consultado el 10 de marzo de 2009: landsat.gsfc.nasa.gov/

Orozco, H. E., V. Peña, R. Franco & N. Pineda. 2004. Atlas agrario ejidal del estado de México, cuadernos de investigación, No. 34, UAEM, Toluca, México in: Pineda jaimes N. B., J. Bosque, M, Gómez & W. Plata. 2008. Análisis del cambio de uso del suelo en el estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivalentes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas* (69):33-52.

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

Palacios, Sánchez L. A., F. Paz Pellat, J. L. Oropeza Mota, B. Figueroa Sandoval, M. Martínez Menes, C. A. Ortiz Solorio & A. Exebio García. 2006. Clasificador de objetos en imágenes ETM+. *Agrociencia* 40(5):613-326.

Paruelo, J. M., J. P. Guerschman & S. R. Verón. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy* 15(87):14-23.

- Pedraza, P. R. A., A. Hoyos, R. Álvarez & E. Inzunza. 2009. Cambio de uso de suelo en la vertiente oriental del parque nacional cofre de perote y sus áreas circunvecinas. VII Congreso Nacional sobre Áreas Naturales Protegidas de México. San Luis Potosí, julio.
- Pennington, Trence D. & J. Sarukhán. 2005. Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. 3ª ed., UNAM, Fondo de Cultura Económica. México, 523 pp.
- Peña, J., R. Poveda, A. Bonet & A. Escarre. 2005. Cartografía de las coberturas y usos del suelo de la Marina Baixa (alicante) para 1956 y 2000. Investigaciones Geográficas (37):93-107.
- Peña-Cortés, F., G. Rebolledo, K. Hermosilla, E. Hauenstein, C. Bertrán, R. Schlatter & J. Tapia. 2006. Dinámica del paisaje para el período de 1980-2004 en la cuenca costera del Lago de Budi, Chile. Consideraciones para la conservación de uso humedales. Ecología Austral (16):183-196.
- Petit, C., T. Scudder & E. Lambin. 2001. Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: resettlement and rapid land-cover changes in south-aestern Zambia. Remote Sensing. 22(17):3435-3456.
- Ramírez, A. J. 2002. Clasificación y corrección de cambios de coberturas del suelo en la comuna de Nihue (secano interior), Provincia de Ñubbe, VIII Región. Rev. Geo. Nor. Gra. (29):95-105.
- Ramírez, M. I. & R. Zubieta. 2005. Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Reporte

Técnico preparado para el Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca.
México D.F. Septiembre 2005.

Ramírez, Ramírez María Isabel. 2001. Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra Angangueo Michoacán y estado de México, 1971-1974-2000. Investigaciones Geográficas (45):39-55.

Ramos, R. R. & A. Rodríguez G. 2010. Análisis de cambios de usos del suelo y cobertura vegetal del período 2000-2010 del municipio de comalcalco, Tabasco, México. Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial. XIV Simposio Internacional SELPER.

Reyes, H., M. Aguilar & J. Aguirre. 2006. Cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo en el área del Proyecto Pujal-Coy, San Luis Potosí, México, 1973-2000. Investigaciones geográficas (59):26-42.

Rincón, R. J. A. 2003. Cambio de uso del suelo en la Sierra Sur de Oaxaca mediante técnicas geomáticas. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México.

Rivera, Ramírez Ricardo. 2007. Servicio de información de imágenes de percepción remota del territorio nacional. Boletín de los sistemas nacionales de estadísticos y de información geográfica. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) 3(1):123-140.

Rodarte, García Raúl. 1997. Ecosistema y biodiversidad en la costa Oaxacaqueña. Acercamiento descriptivo altitudinal. Ciencia y Mar 1(2):44-48.

- Rosete, F., A. Ordoñez & O. Masera. 1997. Dinámica de cambio de uso del suelo y emisiones de carbono en la Meseta Purépecha: "El Caso de la Comunidad Indígena de Santiago Tingambato". Reporte de Investigación, UNAM, México, 31 pp.
- Rosete, F. & G. Bocco. 2003. Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. *Gaceta Ecológica* (68):43-54.
- Rosete, F., J. L. Pérez & G. Bocco. 2008. Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investigaciones Geográficas* (67):39-58.
- RSAC. 2000. Application of remote sensing. Remote Sensing Applications Center *In: Rincón, R. J. A.* Cambio de uso del suelo en la Sierra Sur de Oaxaca mediante técnicas geomáticas, Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, México.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), México, 504 pp.
- Sacristán, Romero Francisco. 2006. La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC* (24):13-41.
- Salazar, Conde E. del Carmen, J. Zavala Cruz, O. Castillo Acosta & R. Cámara Artigas. 2004. Evaluación espacial y temporal de investigación de la sierra madrigal, Tabasco, México (1973-2003). *Investigaciones Geográficas* (54):7-23.
- Salvatierra, C., K. Langer, N. Mustoni, D. Comes, S. Carlos, A. Femenía & P. Rodríguez. 2003. Informe de actividades realizadas con el tratamiento digital de imágenes de satélite para la cuenca del Río Tunuyán inferior. Organización de las Naciones Unidas

para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Departamento General de Irrigación, Provincia de Mendoza, 37 pp.

Sánchez, A. R. L. & S. Rebollar. 1999. Deforestación de la Península de Yucatán, los retos que enfrentar. *Madera y Bosques* 5(2):3-17.

Sánchez-Bernal, E., M. Camacho-Escobar, A. Rodríguez-León & M. Ortega-Escobar. 2012. Characterization of soils affected by salts in irrigation district 110 "Río Verde". Oaxaca, México. *Afri. Jour. of Agri. Res.* 7(6):943-957.

Sánchez, Velásquez L. R., G. Hernández Vargas, M. A. Carranza, Ma. Pineda López, R. Cuevas & F. Aragón. 2002. Estructura arbórea del bosque tropical caducifolio usado para la ganadería extensiva en el norte de la sierra de manantlán, México. *Antagonismo de usos. Polibotánica* (13):25-46.

Sandoval, M. Y. 2003. Monitoreo de quemas de pastizales y cuantificación de superficies devastadas por incendios forestales mediante imágenes NOAA-AVHRR y Landsat ETM 7+. X conferencia Latinoamericana de Usuarios SIG/10, 11 y 12 de Septiembre del 2003. Santa Cruz, Bolivia.

Sanjurjo, Rivera E & S. Welsh Casas. 2005. Una descripción del valor de los bienes y servicios ambientales prestados por los manglares. *Gaceta Ecológica* (74):55-68.

Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2010. Anuario estadístico de la producción agrícola. Municipio de San Pedro Mixtepec, Oaxaca. Consultado el 20 de noviembre 2011: http://www.oeidrus-portal.gob.mx/oeidrus_oax/

- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2010. Compendio de estadísticas ambientales. Consultado el 20 de abril de 2010: http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlet3652.html
- Segura-Castruita, M. A., C. A. Ortiz-Solorio & M. C. Gutiérrez-Castorena. 2004. Localización de suelos de humedad residual a partir de imágenes de satélite: Parte 2. Factores que influyen en su reflectancia y clasificación supervisada con los procedimientos: Mínima distancia y Máxima verosimilitud. *TERRA Latinoamericana* 22(2):135-142.
- Serrano, A. V. 2008. Tecnología para producir maíz de temporal y riego en la costa de Oaxaca. *Agroproduce* (26):23-24.
- Solís-Moreno, R., E. J. Treviño-Garza, O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez & E. Jurado-Ybarra. 2006. Análisis de la cubierta vegetal de la cuenca alta del Río Nazas en Durango, México. *Revista Chapingo. Ser. Cie. For. Med. Amb.* 12(2):139-143.
- Sorani, V. & R. Álvarez. 1996. Hybrids maps: a solution for the updating of forest cartography with satellite images and existing information. *Geocarto International* 11(4):17-23.
- Speranza, F. & H. Zerda. 2005. Clasificación digital de coberturas a partir de datos satelitales multiespectrales. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Unidad Manfredi-Universidad Nacional de Santiago del Estero. Consultado el 15 de mayo de 2010: http://www.inta.gov.ar/manfredi/info/boletines/areasuelos/cober_veg_satel_multi.pdf

SPOT IMAGE. Consultado el 10 de enero de 2010: www.spotimage.com/web/es/253--imagen-satelite-spot-formosat-2-kompsat-2-radar.php

Stehman, V. S. 1996. Estimating the Kappa coefficient and its variance under stratified random sampling. *Pho. Eng. Rem. Sen.* 62(4):401-407.

Story, M. & R. G. Congalton. 1986. Accuracy assessment: A user's perspective. *Pho. Eng. Rem. Sen.* 52(3):397-399.

Torres, Colín R. 2004. Tipos de vegetación. Pp: 105-117 *In: García-Mendoza, A. J., M. J. Ordoñez & M. Briones-Salas (eds.), Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund, México.*

Trejo, I. & J. Hernández. 1996. Identificación de la selva baja caducifolia en el estado de Morelos, México, mediante imágenes de satélite. *Investigaciones Geográficas* (5):11-18.

Vega, G. A., J. López-García & L. de L. Manzano. 2008. 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. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (67):59-75.

Velázquez, A., E. Duran, I. Ramírez, J-F. Mas, G. Bocco, G. Ramírez & J-L. Palacio. 2003. Land use-cover change processes in highly biodiverse areas: the case of Oaxaca, México. *Glo. Env. Cha.* (13):175-184.

- Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz, R. Mayorga, P. C. Alcántara, R. Castro, G. Bocco, E. Ezcurra & J. L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica* (62):21-37.
- Vitousek, M. P., H. A. Mooney, J. Lubchenco & J. M. Melillo. 1997. Human domination of Earth's ecosystem. *Science* (227):494-499.
- Weng, Q. 2002. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modeling. *Jou. Env. Man.* (64):273-284.
- Williams, Linera G., R. H. Manson & E. Isunza Vera. 2002. La fragmentación del bosque mesófilo de montaña y patrones de uso del suelo en la región oeste de Xalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosque* 8 (1):73-89.
- Wright, P. A., A. Hansen, R. E. Kennedy, W. Cohen, U. Langner, R. Lawrence, B. Maxwell, A. Gallant & R. Aspinall. 2003. Land use and cover change in The Greater Yellowstone Ecosystem: 1975-1995. *Ecological applications* 13(3):687-703.
- Zimmermann, R. & V. Horna. 2003. Estudio multitemporal para calcular la tasa de deforestación en la cuenca del Alto Mayo, Perú. *Estudio Multitemporal-CONAMBI*, 41 pp.

XI. Anexos

Anexo 1. Características de los satélites de la serie Landsat.

Satélite	Sensor	Bandas	Rango espectral	Resolución
Landsats 1-2	RBV	1	0.48 - 0.57	80
		2	0.58 - 0.68	80
		3	0.70 - 0.83	80
	MSS	4	0.5 - 0.6	79
		5	0.6 - 0.7	79
		6	0.7 - 0.8	79
		7	0.8 - 1.1	79
Landsat 3	RBV	1	0.505 - 0.75	40
	MSS	4	0.5 - 0.6	79
		5	0.6 - 0.7	79
		6	0.7 - 0.8	79
		7	0.8 - 1.1	79
8	10.4 - 12.6	240		
Landsats 4-5	MSS	4	0.5 - 0.6	82
		5	0.6 - 0.7	82
		6	0.7 - 0.8	82
		7	0.8 - 1.1	82
	TM	1	0.45 - 0.52	30
		2	0.52 - 0.60	30
		3	0.63 - 0.69	30
Landsat 7	ETM+	4	0.76 - 0.90	30
		5	1.55 - 1.75	30
		6	10.4 - 12.5	30
		7	2.08 - 2.35	30
		Pancromática	0.50 - 0.90	15

Anexo 2. Características de los satélites de la serie Spot.

Satélite	Sensor	Bandas	Rango espectral	Resolución
Spot 5	2 HRG	1	0.50 - 0.59	10
		2	0.61 - 0.68	10
		3	0.78 - 0.89	10
		4	1.58 - 1.75	20
		Pancromática	0.48 - 0.71	2.5 ó 5
Spot 4	2 HRVIR	1	0.50 - 0.59	20
		2	0.61 - 0.68	20
		3	0.78 - 0.89	20
		4	1.58 - 1.75	20
		Monoespectral	0.61 - 0.68	10
Spots 1-2-3	2 HVR	1	0.50 - 0.59	20
		2	0.61 - 0.68	20
		3	0.78 - 0.89	20
		Pancromática	0.50 - 0.73	10

Anexo 3. Parámetros geográficos de la información utilizada.

Información	Proyección	Datum	Elipsoide
Imágenes de Satélite (1990, 2000 y 2010)	Universal Transversal Mercator (UTM)	WGS84	WGS84
INF 1994 y 2000	Cónica Conforme de Lambert	NAD27	Clarke 1866
Polígono del Municipio	Coordenadas Geográficas	NAD27	Clarke 1866
La cartografía INEGI (1: 000000, 1: 250 000 y 1: 50 000)	Universal Transversal Mercator	ITRF92	GRS80

Anexo 4. Puntos de control para la corrección geométrica de la imagen Spot 2010.

No. Punto de control	Proyección Universal Transversal Mercator (UTM) de la imagen a rectificar		Proyección Universal Transversal Mercator (UTM) de los vectoriales (carreteras)	
	X	Y	X	Y
1	705826.57	1756393.4	705871.18	1756372.01
2	719278.02	1758646.45	719300.82	1758628.79
3	728483.39	1777881.03	728546.69	1777834.7
4	698303.41	1779576.41	698327.90	1779565.16
5	717611.97	1751986.75	717645.17	1751966.43
6	728222.87	1753563.14	728261.09	1753540.03
7	688567.09	1764856.28	688584.04	1764826.59
8	712062.34	1750604.02	712085.29	1750588.28
9	707417.27	1774259.72	707445.34	1774244.06
10	705817.51	1764553.12	705865.86	1764536.12
11	705835.07	1757872.58	705859.99	1757858.82
12	696558.35	1761535.2	696582.42	1761528.36
13	697870.11	1762323.59	697885.46	1762309.24
14	697731.12	1762057.09	697742.74	1762045.75
15	697792.25	1761906.68	697814.10	1761890.68
16	701011.77	1760244.57	701026.62	1760241.98

Anexo 5. Fotografías de los usos de suelo y coberturas forestales obtenidas a través del muestreo en campo del año 2010.



Bosque de encino

Punto No. 284

Proyección UTM (Datum y Elipsoide WGS84):

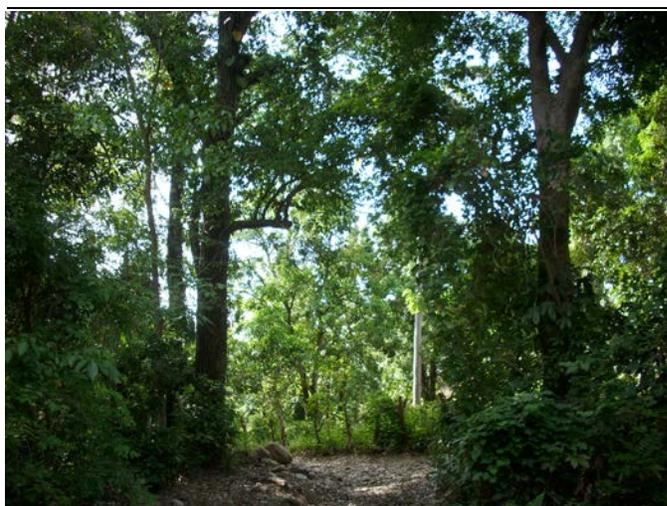
X: 702401

Y: 1771616

Altitud: 550 msnm

Fecha: 9 de mayo 2012

Ubicación: El Zacatal



Selva Mediana subperennifolia

Punto No. 112

Proyección UTM (Datum y Elipsoide WGS84):

X: 704977

Y: 1768950

Altitud: 208 msnm

Fecha: 21 de abril 2012

Ubicación: San Pedro (cabecera)-El Huarumbo



Selva Baja Caducifolia

Punto No. 205

Proyección UTM (Datum y Elipsoide WGS84):

X: 700944

Y: 1766052

Altitud: 238 msnm

Fecha: 25 de abril 2012

Ubicación: La Cienega



Manglar

Punto No. 272

Proyección UTM (Datum y Elipsoide WGS84):

X: 696076

Y: 1763083

Altitud: 0 msnm

Fecha: 8 de mayo 2012

Ubicación: Aguaje del Zapote



Pastizal

Punto No. 121

Proyección UTM (Datum y Elipsoide WGS84):

X: 705241

Y: 1769952

Altitud: 320 msnm

Fecha: 21 de abril 2012

Ubicación: Callejón de Arroyo Tigre



Zonas Agrícolas

Punto No. 151

Proyección UTM (Datum y Elipsoide WGS84):

X: 706089

Y: 1769262

Altitud: 338 msnm

Fecha: 22 de abril 2012

Ubicación: Vereda San Pedro (cabecera)-Toledo



Cuerpos de Agua

Punto No. 151

Proyección UTM (Datum y Elipsoide WGS84):

X: 693008

Y: 1763255

Altitud: 0 msnm

Fecha: 22 de abril 2012

Ubicación: Laguna de Manialtepec



Áreas urbanas

Punto No. 40

Proyección UTM (Datum y Elipsoide WGS84):

X: 705061

Y: 1767919

Altitud: 200 msnm

Fecha: 11 de abril 2012

Ubicación: San Pedro (cabecera)



Áreas sin Vegetación aparente

Punto No. 59

Proyección UTM (Datum y Elipsoide WGS84):

X: 702878

Y: 1755666

Altitud: 1 msnm

Fecha: 13 de abril 2012

Ubicación: Punta colorada

Anexo 6. Separabilidad entre firmas espectrales para 1990, 2000 y 2010.

Separabilidad espectral 1990									
	Bq	SMq	SBc	Vm	Pa	Za	Ca	Au	Dv
Bq	0								
SMq	1,535.16	0							
SBc	2,000	1,929.02	0						
Vm	1,999.24	1,997.26	2,000	0					
Pa	2,000	2,000	1,859.76	2,000	0				
Za	2,000	2,000	1,659.07	2,000	1,840.81	0			
Ca	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	0		
Au	2,000	2,000	1,999.98	2,000	2,000	1,991.34	2,000	0	
Dv	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,999.95	2,000	1,912.91	0

TOTAL 1964.57

Separabilidad espectral 2000									
	Bq	SMq	SBc	Vm	Pa	Za	Ca	Au	Dv
Bq	0								
SMq	1,749.81	0							
SBc	1,999.98	1,677.4	0						
Vm	2,000	1,996.52	2,000	0					
Pa	2,000	1,999.67	1,900.51	2,000	0				
Za	2,000	2,000	1,996.96	2,000	1,881.22	0			
Ca	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	0		
Au	2,000	2,000	1,999.99	2,000	1,999.99	1,997.33	2,000	0	
Dv	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,898.08	0

TOTAL 1974.93

Separabilidad espectral 2010									
	Bq	SMq	SBc	Vm	Pa	Za	Ca	Au	Dv
Bq	0								
SMq	1,963.82	0							
SBc	2,000	1,814.92	0						
Vm	2,000	1,999.61	1,997.79	0					
Pa	2,000	1,986.09	1,348.15	1,999.99	0				
Za	2,000	2,000	1,998.06	2,000	1,997.97	0			
Ca	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	0		
Au	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,853.95	2,000	0	
Dv	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,960.75	2,000	1,321.52	0

TOTAL 1951.18