



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS
AMBIENTES URBANOS DE LA CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN
BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT TM/ETM+/
OLI (1986-2014)”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOMÁTICO

PRESENTA:

SANDOVAL MANRÍQUEZ HANNALI

DIRECTOR DE TESIS:

Mtro. JUAN MANUEL NÚÑEZ HERNÁNDEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F., 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/122/15

Señorita
HANNALI SANDOVAL MANRÍQUEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.G. JUAN MANUEL NÚÑEZ HERNÁNDEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO GEOMÁTICO.

"CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN. BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT TM/ETM+/OLI (1986-2014)"

- INTRODUCCIÓN
- I. MARCO TEÓRICO
- II. METODOLOGÍA Y MATERIALES
- III. RESULTADOS
- IV. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 26 de noviembre del 2015.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LOPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

ROBERTO ASCENCIO
03/02/16

Juan Manuel Nuñez
02/02/16

Ma. Elena Osorio Tejeda
02 febrero

2/02/16

Dra. Patricia Ortiz Amador
02-feb-2016

Adolfo Reyes Pizarro

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA
CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT
TM/ETM+/ OLI (1986-2014)

GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

BCI (Biophysical Composition Index): Índice de composición biofísica.

CINVESTAV: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados.

CONAPO: Consejo Nacional de Población.

CS: Clasificación Supervisada.

DEA (Detected Area Efficiency): Eficiencia de área detectada.

DIA (Detected Impervious Area): Área impermeable detectada.

ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus): Mapeador temático.

FAR (False Area Rate): Tasa de área falsa.

FIA (False Impervious Area): Área impermeable falsa.

H (High Albedo Material): Material de alto albedo.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

L (Low albedo material): Material de bajo albedo.

ND: Niveles Digitales.

NDBI (Normalized Difference Built-Up Index): índice de diferencia normalizado urbanizado.

NDISI (Normalized Difference Impervious Surface Index): Índice superficie impermeable diferencia normalizada.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): índice de vegetación de diferencia normalizada.

OLI (Operational Land Imager): Cámara Terrestre Operacional.

ONU: Organización de las Naciones Unidas.

SAR (Skipped Area Rate): Tasa de área omitida.

SEDESOL: Secretaría de Desarrollo Social.

SI: Superficies Impermeables

SIA (*skipped impervious area*): área impermeable omitida.

TC (*Tasseled Cap*): Transformación Tasseled Cap.

TM (*Thematic Mapper*): Cartografía temática.

V (*Vegetation*): Vegetación.

VIS (*Vegetation-Impervious Surface-Soil*): Modelo de vegetación-superficies impermeables- suelos.

ZM: Zona Metropolitana.

ZMM: Zona Metropolitana de Mérida.

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
OBJETIVOS	5
<i>Objetivo general</i>	5
<i>Objetivos particulares</i>	5
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	6
1.1 <i>Percepción remota para la estimación de variables biofísicas</i>	6
1.2 <i>La naturaleza de los ecosistemas urbanos</i>	9
1.3 <i>Composición Biofísica de Ambientes Urbanos</i>	10
1.4 <i>El modelo V-I-S de Ridd</i>	16
1.5 <i>Transformación Tasseled Cap (TC)</i>	19
1.6 <i>Monitoreo espacio - temporal</i>	25
1.7 <i>Monitoreo espacio - temporal en zonas urbanas</i>	26
CAPITULO 2. METODOLOGÍA Y MATERIALES	28
2.1 <i>Zona Metropolitana de Mérida (ZMM)</i>	28
2.2 <i>Zona de estudio</i>	30
2.3 <i>Materiales</i>	31
2.4 <i>Metodología</i>	33
CAPÍTULO 3. RESULTADOS	37
3.1 <i>Mapeo y caracterización de las Superficies Impermeables</i>	37
3.2 <i>Evaluación de la precisión del mapeo de las Superficies Impermeables</i>	44
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	51

RESUMEN

Cuantificar los cambios en la superficie impermeable es importante en el monitoreo de los ambientes urbanos y en el entendimiento de las actividades humanas. Se trata de una de las principales características de la composición urbana que resulta esencial para la estimación de factores socio-económicos y ambientales, tales como la densidad de construcción y las emisiones de gases de efecto invernadero. En este trabajo, una aproximación metodológica para evaluar el cambio en la superficie impermeable es presentada a través del análisis de imágenes Landsat TM/ETM+/OLI para la Zona Metropolitana de Mérida en Yucatán, México. Estimaciones de superficie impermeable fueron generadas a partir de la segmentación de bajo y alto albedo de la composición biofísica cuantificada para los años 1986, 2000 y 2014. Con el objetivo de evaluar la precisión, se propuso una estrategia que combina las formas tradicionales de elaboración de matrices de confusión y cálculo del coeficiente de concordancia *kappa*. La mejor eficiencia fue la de Landsat ETM+, seguida de Landsat OLI, mientras que Landsat TM muestra un resultado pobre.

Palabras clave: Composición biofísica, superficie impermeable, Landsat

INTRODUCCIÓN

El proceso de urbanización y el acelerado crecimiento de la población constituyen uno de los fenómenos mundiales de mayor importancia en el desarrollo de la sociedad humana y del medio en que ésta se desenvuelve. La urbanización es un proceso complejo que consiste en la expansión y la modificación de los sectores urbanos ya existentes en la sociedad, y que tiene por consecuencia la alteración de las relaciones urbano - rurales dentro de ella, condicionando y estimulando cambios en los sectores rurales.

Este proceso tiene como consecuencia problemas ambientales, económicos y sociales, por eso la necesidad de estudiar y entender a fondo las consecuencias que se producen en los procesos de intervención de la sociedad sobre la naturaleza.

De acuerdo con la ONU, en la segunda mitad del siglo XX la población urbana en todo el mundo casi se cuadruplicó, pasando de 723 millones en 1950 a 2800 millones en 2000. Para el 2005, el 49% de la población mundial, 3180 millones de habitantes, vivía en ciudades. En 2008, por primera vez en la historia de la humanidad, más de la mitad de sus habitantes viven ya en áreas urbanas (Lee, 2007). Actualmente el 54% de la población mundial reside en áreas urbanas y se prevé que para 2050 este porcentaje llegara al 66%.

En México, estas tendencias de crecimiento no son ajenas, ya que desde la década de los años setenta su población habita mayoritariamente en núcleos urbanos, y se espera que a mediano plazo la población urbana llegue a superar el 80% del total nacional.

Esto nos habla de la gran demanda de suelo para la construcción de espacios urbanos; así, el acelerado crecimiento de la población urbana es un factor en la transformación de los usos de suelo naturales a urbanos. Estos cambios requieren

la aplicación de técnicas que permitan monitorear y evaluar correctamente su evolución a lo largo del tiempo.

El monitoreo espacio-temporal de las zonas urbanas es de gran importancia para entender los efectos de esta transformación. Tal es la importancia de este monitoreo que han surgido nuevas disciplinas dedicadas a estudiar los mecanismos biofísicos y humanos que los producen. Algunos de los cambios que se pueden observar a través del monitoreo Espacio-Temporal en áreas urbanas son: Densidad de la población y su distribución, geometría de las zonas urbanas, uso de la tierra (vegetación, suelos desnudos, superficies impermeables), por mencionar algunos.

Las superficies impermeables (SI) se definen esencialmente como todas aquellas superficies o estructuras que impiden el infiltración del agua y, por tanto, evita muchos de los servicios ecosistemáticos asociados con el suelo: producción de alimentos; hábitat para las plantas; regulación del micro-clima, etc. (Scott *et al.*, 2014).

Estimar la cantidad, magnitud, localización, geometría y morfología de las superficies impermeables (SI) en los distintos niveles de paisaje (local, regional y global) es de gran importancia en el contexto de monitoreo de cambio climático por su contribución a la degradación del medio ambiente (Weng, 2012; Arnold & Gibbons, 1996); además de ser uno de los principales indicadores de las implicaciones del desarrollo urbano (Yang *et al.*, 2014).

Los sistemas de percepción remota son una herramienta de gran importancia para realizar estudios cuyo objetivo es la observación, evaluación y monitoreo de los recursos naturales debido a la gran cantidad de información y el potencial de análisis que estos ofrecen.

Estas herramientas han facilitado la tarea de monitorear grandes extensiones de tierra de forma exacta, las tendencias espacio-temporales del uso y cobertura del suelo en las áreas de extensión urbana. En años recientes las aplicaciones de

Percepción Remota para ambientes urbanos han resultado ser una herramienta útil para la planeación urbana.

Existe una gran diversidad de imágenes obtenidas desde plataformas satelitales que nos permite analizar el territorio desde una perspectiva cada vez más completa. La variedad de resoluciones espaciales hace posible realizar estudios a diferentes escalas. La resolución espectral posibilita la caracterización de espacios en la superficie terrestre. Todo ello, unido a la periodicidad de adquisición de las imágenes, hace que estas técnicas sean idóneas para seguir la evolución del territorio a lo largo del tiempo.

Este trabajo propone la aplicación de una aproximación metodológica para evaluar el cambio de las superficies impermeables mediante la cuantificación de la composición biofísica de los ambientes urbanos. El enfoque original basado en el análisis de imágenes Landsat TM/ETM+/OLI, permite identificar patrones espectrales en las imágenes asociados con las superficies impermeables. El trabajo se organiza de la siguiente manera: en el Capítulo 1 introduce los fundamentos teóricos de la propuesta; a continuación, el capítulo 2 presenta el área de estudio, los conjuntos de datos empleados y su procesamiento; los resultados mostrados en el capítulo 3 incluyen los cambios en la superficie urbana entre 1986 y 2014 para la Zona Metropolitana de Mérida, además de los resultados de la evaluación de precisión; finalmente algunas conclusiones acerca del trabajo se presentan en el capítulo 4.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Evaluar a través de un Índice de Composición Biofísica para ambientes urbanos la superficie impermeable de la zona metropolitana de la Ciudad de Mérida.

Objetivos particulares

- Aplicar la metodología de la composición biofísica mediante BCI en la Zona Metropolitana de Mérida, Yucatán.
- Determinación de la superficie impermeable.
- Monitoreo espacio temporal de las superficies impermeables (años 1986 - 2000 - 2014).
- Evaluar la precisión de los resultados con ayuda de una estrategia que combina las formas tradicionales de elaboración de matrices de confusión, cálculo del coeficiente kappa y evaluación del acuerdo.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Percepción remota para la estimación de variables biofísicas

Con el tiempo, las tecnologías para coleccionar datos de la superficie terrestre han ido evolucionando. Anteriormente, uno de los métodos de recopilación de datos más usados era el método “In Situ”, que es una expresión que significa “en el sitio” o “en el lugar”, y que consiste en tener un investigador ubicado en el área de estudio para observar algún fenómeno o en usar transductores que se colocan en contacto directo con los fenómenos de interés, por ejemplo, termómetros, sismógrafos, por mencionar algunos. Sin embargo, la percepción remota se aparta de estos métodos de recolección de datos, ya que el sensor remoto no está en contacto directo con los fenómenos.

Todo sistema de percepción remota tiene tres principales elementos que lo conforman: sensor, objeto observado y flujo energético que permite poner al sensor y al objeto observado en relación. Este flujo energético se puede dar de diferentes maneras: (i) que el flujo proceda del objeto por reflexión de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro planeta, (ii) tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto o (iii) incluso por el sensor. En cualquiera de estos casos, el flujo energético entre la superficie terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética (Chuvienco, 2002), que consiste en una combinación de campos eléctricos y magnéticos, que se propagan en forma de ondas portadoras de energía.

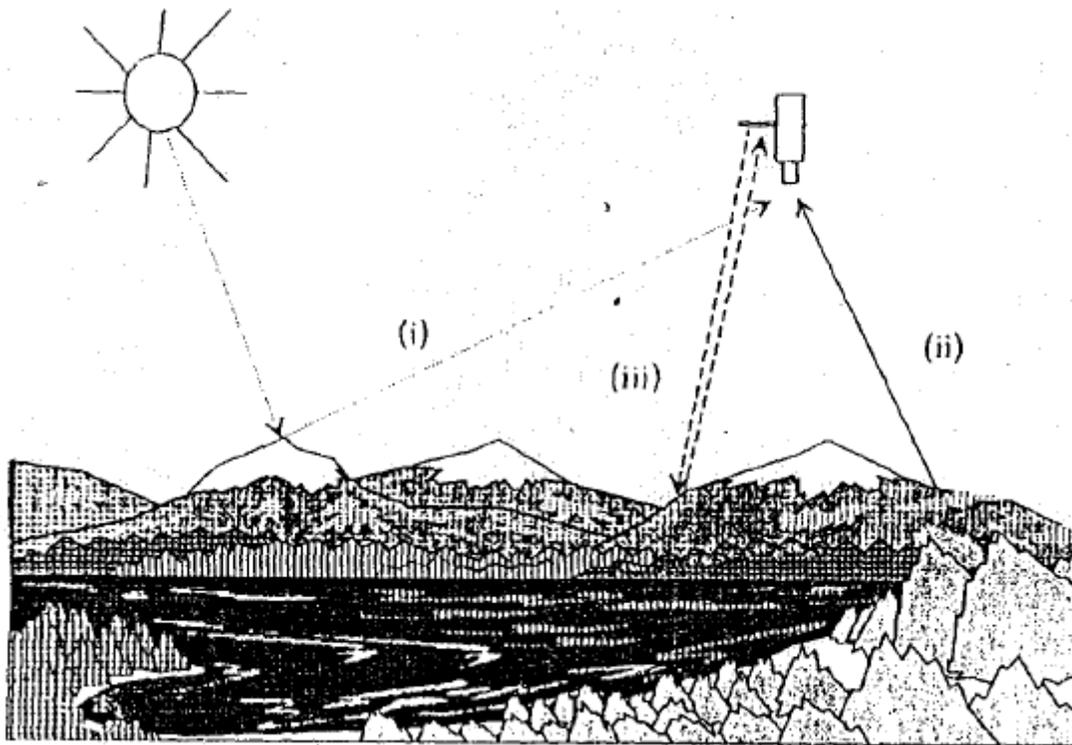


Figura 1. Formas de Teledetección (Chuvieco, 2002)

Las propiedades de la radiación electromagnética se convierten en una valiosa fuente de datos para interpretar las propiedades de los fenómenos que interactúan en la superficie terrestre.

La percepción remota no sólo es un medio para recoger datos que proporcionan mapas de clasificación de los distintos tipos de cobertura que existen en la tierra. Recientemente, la observación de la tierra con percepción remota consiste en la recopilación de información y mediciones sobre variables biofísicas; estas variables son dirigidas por procesos físicos y biológicos que suceden en la superficie terrestre. De esta manera, se espera que la percepción remota se pueda utilizar no solo para clasificación de coberturas, sino para recopilar datos para el modelado y simulación de procesos biofísicos como el modelado de la temperatura de la superficie terrestre.

El departamento de geografía de la universidad de Carolina del Sur, en EUA, realizo una investigación para conocer cuáles son las variables biofísicas que se pueden encontrar en la superficie terrestre. Primero, es importante saber que existen dos clases de variables. En primer lugar, hay variables fundamentales que los sensores remotos pueden medir directamente, sin un análisis intermedio o una combinación con otras variables, por ejemplo, localización de objetos, la altura y la temperatura. En segundo lugar están las variables híbridas que son establecidas por más de una variable, un ejemplo de este tipo de variables sería el estrés de la vegetación, que puede detectarse midiendo la absorción de clorofila y el contenido de humedad de la vegetación. La variedad de variables híbridas es infinita.

En la superficie terrestre, existen muchos fenómenos que pueden ser detectados de forma remota (vegetación, tipos de suelos, agua, fenómenos urbanos), estos fenómenos fueron estudiados por el departamento de Geografía, de la universidad de Columbia EUA para identificar tipos de variables fundamentales de cada uno de estos fenómenos.

A continuación se muestran las nueve variables biofísicas que fueron identificadas:

- Ubicación planimetría (X, Y).
- Elevación topográfica/batimetría (X, Y, Z).
- Color y la característica de la firma espectral.
- Características de absorción de la clorofila en la vegetación.
- Biomasa vegetal.
- Contenido de humedad de la vegetación.
- Contenido de humedad del suelo.
- Temperatura.
- Textura o rugosidad de la Superficie.

1.2 La naturaleza de los ecosistemas urbanos

¿Qué es un ecosistema urbano?, lo primero es definir qué es un ecosistema. Un ecosistema es un sistema natural que se forma a través de la coexistencia de organismos vivos con el medio físico en el que se relacionan, es decir, una unidad compuesta de organismos vivos que comparten el mismo hábitat e interactúan con él.

Entonces, cuando se habla de un ecosistema urbano, estamos hablando de las ciudades como hábitat, y de todos los seres vivos que conviven en ella.

Estos ambientes han crecido durante el último siglo y la tendencia sigue en aumento, tanto en extensión como en población, hoy más que nunca, la mayoría de los seres humanos viven y construyen los ecosistemas urbanos.

Estos ecosistemas son abiertos y dinámicos, consumen, transforman y liberan materiales y energía; se desarrollan y se adaptan; y están determinados por los seres humanos e interactúan con otros ecosistemas (Barrios, 2009). Por todo ello las ciudades deben ser analizadas y gestionadas como cualquier otro tipo de ecosistema

El calor generado por la quema de combustible y el uso de la electricidad, originan trastornos climáticos locales, conocidos como “inversiones térmicas”. Además las superficies impermeables modifican el flujo de las aguas pluviales, impiden la penetración de agua en el subsuelo y aumentan la relación entre la radiación incidente y la reflejada del suelo. Estos son algunos ejemplos de la naturaleza de este tipo de ecosistemas.

Las ciudades alteran substancialmente las condiciones naturales del entorno:

- Climáticos, temperatura, humedad, viento.

- Físicos, cambio de geomorfología territorial.
- Lumínicos, luz artificial.
- Equilibrio ambiental, contaminación por ruido y vibraciones.

1.3 Composición Biofísica de Ambientes Urbanos

Cada ecosistema que se observa en la superficie terrestre contiene procesos biofísicos diferentes; estos procesos son fenómenos observados en la naturaleza, por ejemplo, la fotosíntesis, evapotranspiración, humedad o energía, por mencionar algunos.

El uso de la información provista por los sensores remotos tiene un enorme impacto, ya que brinda la posibilidad de describir la heterogeneidad estructural del territorio. La identificación de estos patrones espaciales permite elaborar hipótesis acerca de los procesos estructurales de los ambientes urbanos y ecológicos (Lillesand & Kiefer, 2014).

El crecimiento de las superficies urbanas lleva asociados tipos de cobertura del suelo que pueden ser una combinación de tres componentes: Superficies impermeables, vegetación y suelos desnudos. Estos son los componentes más fundamentales del ecosistema urbano en términos de contraste que pueden ser bien identificados (Ridd, 1995) tanto en los entornos de la periferia de la ciudad como dentro de la ciudad. La diversidad de estos tres componentes tiene un impacto significativo en la dinámica, la distribución de energía y humedad en los ambientes urbanos.

Las coberturas de mayor crecimiento son las superficies impermeables, también conocido como sellamiento del suelo. Y se define esencialmente como todas aquellas superficies o estructuras artificiales cuyo material impide la infiltración del agua y, por tanto, evita muchos de los servicios ecosistémicos asociados con el

suelo: producción de alimentos; hábitat para las plantas; regulación del microclima, pérdida de superficies de recarga para los acuíferos etc. (Scott et al., 2014)

También existe el proceso de crecimiento de estas superficies y se pueden reconocer varias etapas. La primera de ellas tiene que ver con la expansión: la ciudad crece transformando el suelo rural en urbano. La segunda es la de la consolidación, donde se ocupan algunos espacios de suelos desnudos o vegetación para hacer calles, edificios, avenidas, etc. Y la tercera etapa es posible identificarla con la densificación, que tiene lugar cuando las áreas consolidadas comienzan a crecer en altura. Estas etapas conviven de manera simultánea en la ciudades: mientras que en un extremo la ciudad crece, en otro se consolida y en el centro se densifica.

La vegetación es un término que engloba todo tipo de vida vegetal, sea salvaje o cultivada. La vegetación en los ambientes urbanos se ha reducido drásticamente.

El suelo desnudo significa un tipo de suelo sin ningún tipo de vegetación, es un término que sirve para distinguir en las zonas urbanas entre las superficies impermeables y el suelo desnudo permeable.

La vegetación y el suelo desnudo se consideran superficies no impermeables y se pueden definir como:

- Todas las áreas con cubierta vegetal (natural y artificial).
- Cuerpos del agua y área de humedales.
- Áreas estériles que ocurren naturales (es decir orillas rocosas, arena, suelo desnudo).
- Áreas despojadas de su vegetación natural por el hombre.

CATEGORÍAS	CLASES
Superficies impermeables	1 Carreteras principales – pavimentadas
	2 Caminos de menor importancia – pavimentados
	3 Senderos y andadores peatonales pavimentados
	4 Casas/tejados de construcciones
	5 Estacionamientos
	6 Cualquier otra área con pavimento
	7 Pistas de aterrizaje
	8 Puentes
	9 Estadios, naves industriales y comerciales
Superficies no impermeables	10 Patios – suelo/ hierba
	11 Áreas abiertas
	12 Granjas/campos
	13 Parques
	14 Áreas verdes
	15 Vegetación en casas
	16 Cuerpos de agua

Tabla 1. Clasificación de superficies impermeables y no impermeables (Scott et al., 2014)

Existen técnicas para cuantificar las características biofísicas de la superficie terrestre, los llamados índices de vegetación, estos índices son una combinación de valores de reflectancia en diferentes longitudes de onda, con alta sensibilidad en la vegetación y baja sensibilidad en otra cubierta (suelo). Se han desarrollado varios índices para cuantificar estas características biofísicas de la superficie terrestre, entre los más destacados se encuentran el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), el *Normalized Difference Built-Up Index* (NDBI) y el *Normalized Difference Impervious Surface Index* (NDISI) (Deng & Wu, 2013). Aunque estos índices han demostrado ser eficaces en cierto grado, cuando se aplican a entornos urbanos todavía existen varios problemas. Uno de ellos es que la mayoría fueron diseñados para estimar diversos parámetros de las cubiertas vegetales y se crean confusiones entre otros tipos de cobertura, en particular entre las superficies impermeables y el suelo desnudo. Por ejemplo, el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) está diseñado para la mejora de la señal en la abundancia de la vegetación, sin embargo, las superficies impermeables están siempre confundidas con el suelo desnudo. El segundo problema de los índices espectrales se asocia con la limitación de imágenes de sensores remotos, en diferentes resoluciones espaciales y espectrales. No todos los índices espectrales antes mencionados están disponibles para la mayoría de imágenes de alta resolución espacial, debido a que no cuentan con la banda del infrarrojo de onda corta.

Todos los tipos de cobertura en el suelo (excepto el agua), en un entorno urbano, como ya se mencionó, pueden considerarse como una combinación de los 3 componentes biofísicos básicos (vegetación, superficie impermeable y suelo).

Sobre esta base, se desarrollan 2 principales categorías de métodos para cuantificar la composición biofísica en zonas urbanas:

1. Métodos de aprendizaje automático, que incluyen la red neuronal artificial (ANN, por sus siglas en inglés) (Flanagan & Civco, 2001; Mohopatra & Wu, 2008), o las técnicas de segmentación orientadas a objetos, el método de decisión del árbol de regresión y modelos de regresión. Con este método de aprendizaje automático, la información biofísica se deriva de una relación empírica, esto quiere decir que está basado exclusivamente en la observación más que en la teoría.
2. La segunda categoría se basa en la desmezcla de técnicas espectrales (Wu & Murray, 2003), bajo la suposición de que el espectro de un pixel comprende varios tipos de cobertura; a este análisis se le conoce como mezclas espectrales. Esta técnica permite transformar las imágenes originales en otras con un significado físico, obteniendo de esta forma imágenes de diferentes componentes (por ejemplo de vegetación, suelo), este método se ha empleado para el análisis de los entornos urbanos con diferentes grados de éxito, pero se complica computacionalmente cuando se trata de aplicarlo a un área geográficamente grande.

El departamento de Geografía de la Universidad de Wisconsin (2014) desarrolló un índice de composición biofísica para Percepción Remota de los entornos urbanos, para la derivación simple y conveniente de la composición biofísica en zonas urbanas.

El *Biophysical Composition Index* (BCI) es un indicador cuantitativo diseñado para la caracterización de la composición biofísica de los entornos urbanos, basado en el modelo triangular de Ridd (1994), que relaciona los datos de la cobertura terrestre obtenidos con percepción remota con los aspectos biofísicos de los entornos urbanos (Deng & Wu, 2012). Bajo este índice la estructura urbana queda definida como una combinación de las coberturas de vegetación, suelos desnudos y superficies impermeables. Espectralmente, el BCI puede separar mejor las superficies impermeables de los suelos desnudos y tiene una mejor correlación

con la vegetación y las superficies impermeables, en comparación con otros índices.

El BCI se deriva a partir de una reinterpretación de la transformación *Tasseled Cap* (TC) (Deng & Wu, 2012); esta transformación pretende poner en evidencia el comportamiento espectral de la vegetación y el suelo, al crear nuevos ejes ajustados al espacio físico, que son: brillo, verdor y humedad.

A continuación se muestran las ecuaciones para generar el BCI:

$$BCI = \frac{(H + L)/2 - V}{(H + L)/2 + V}$$

$$H = \frac{TC1 - TC1_{\min}}{TC1_{\max} - TC1_{\min}}$$

$$V = \frac{TC2 - TC2_{\min}}{TC2_{\max} - TC2_{\min}}$$

$$L = \frac{TC3 - TC3_{\min}}{TC3_{\max} - TC3_{\min}}$$

Donde H es “high albedo material”, L es “low albedo material”, y V es “vegetation”; estos tres componentes están dados por la fórmula siguiente: TC_i ($i = 1,2,3$) que son los tres componentes de TC; TC_i min y TC_i max son los valores mínimos y máximos de los respectivos componentes de la Transformación *Tasseled Cap*.

1.4 El modelo V-I-S de Ridd

Ridd (1995) desarrollo un modelo conceptual que trata de relacionar los datos de la cobertura terrestre obtenidos con percepción remota con los aspectos biofísicos de los ambientes urbanos dentro de un esquema jerárquico de decisiones. De este modo la estructura urbana queda definida como una combinación de coberturas simples: Vegetación, superficies impermeables y suelos (V-I-S – VEGETATION – IMPERVIOUS SURFACE - SOIL). La base teórica sobre la cual se sostiene el índice de composición biofísica (BCI) es el modelo triangular V-I-S de Ridd.

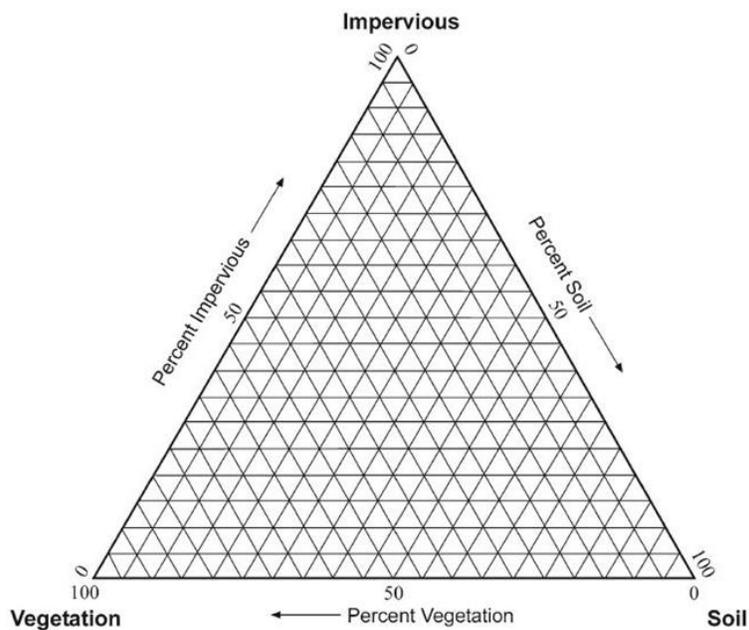


Figura 2. Modelo (Vegetación-superficies impermeables- suelo) de la composición de la cubierta urbana (Ridd, 1995)

Este modelo puede ser aplicable en varias escalas de observación: sub pixel, pixel o grupos de pixeles similares, dependiendo tanto de la resolución espacial de la imagen satelital, como de la complejidad espacial del ambiente urbano u objeto de estudio, esto se debe a que un pixel dado podría ser puro, lo cual sucede cuando

su contenido es solamente de vegetación, superficies impermeables o de suelo, o consistir en una mezcla de los tres componentes anteriores, en un solo pixel (Ridd, 1995).

Dentro de los objetivos de la percepción remota aplicada a entornos urbanos podemos encontrar lo siguiente: Morfología urbana, sistemas biofísicos y sistemas humanos, en cada uno de los cuales el modelo V-I-S es funcional.

La morfología urbana es la unidad básica y su estructura es el pixel, los pixeles se agrupan en unidades espaciales con diferentes objetivos, uno de los cuales es el monitoreo de cambios. A partir de la morfología urbana se pueden obtener información acerca de los sistemas biofísicos y los sistemas urbanos. Los sistemas biofísicos están dados por las variables biofísicas que se pueden encontrar en un entorno urbano (energía, humedad, vegetación), mientras que los sistemas humanos están dados por variables socioeconómicas como la densidad de población; la combinación de vegetación, superficies impermeables y suelos es fundamental para la interpretación de estos sistemas.

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT TM/ETM+/ OLI (1986-2014)

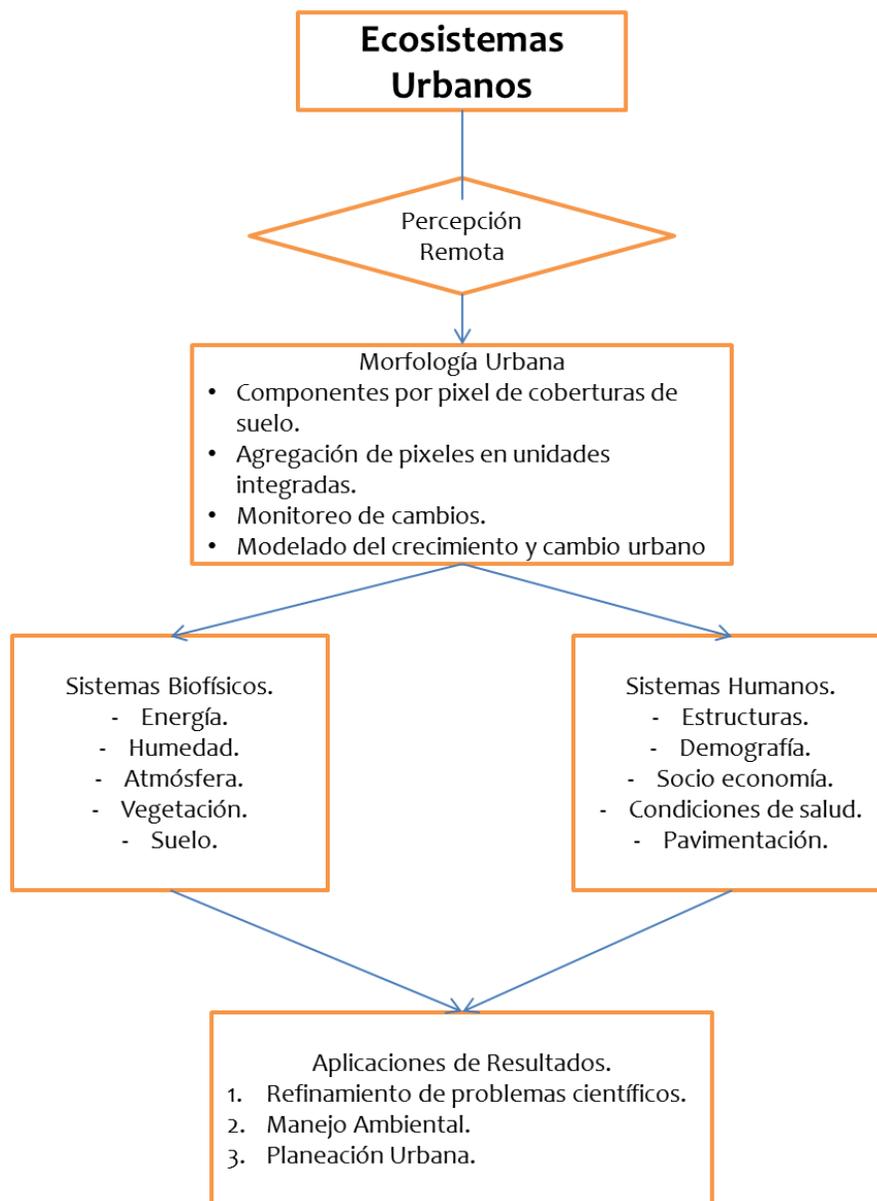


Figura 3. Síntesis sobre los ecosistemas urbanos y la presencia de la Percepción Remota como aplicación tangible a la solución de problemas en un ambiente urbano/ecológico (Ridd, 1995)

1.5 Transformación Tasseled Cap (TC)

El análisis de la información adquirida por medios remotos requiere un tratamiento tal que pueda sintetizar la información asociada a las características físicas, lo cual puede ser logrado tomando en consideración tres ideas centrales: 1) entendimiento de las relaciones entre las bandas espectrales para las clases de interés en la escena, 2) compresión de las n bandas espectrales de información dentro de un número manejable de entidades, 3) extracción de las características físicas de la escena por parte de las entidades espectrales. La transformación *Tasseled Cap* cumple con lo anunciado anteriormente, esta transformación fue ideada en 1976 por R. J. Kauth y G. S. Thomas en el Instituto de Investigación Medioambiental de Michigan (ERIM), con el objetivo de mejorar la predicción de cosechas. A partir de una serie de imágenes de zonas agrícolas se trató de sintetizar los ejes de variación espectral de los cultivos en una figura tri-dimensional, de aspecto parecido a un gorro con borlas. La base de este gorro se define por la línea de suelos, donde se sitúan los distintos tipos de suelo, de acuerdo a su brillo y color (Chuvienco, 2002).

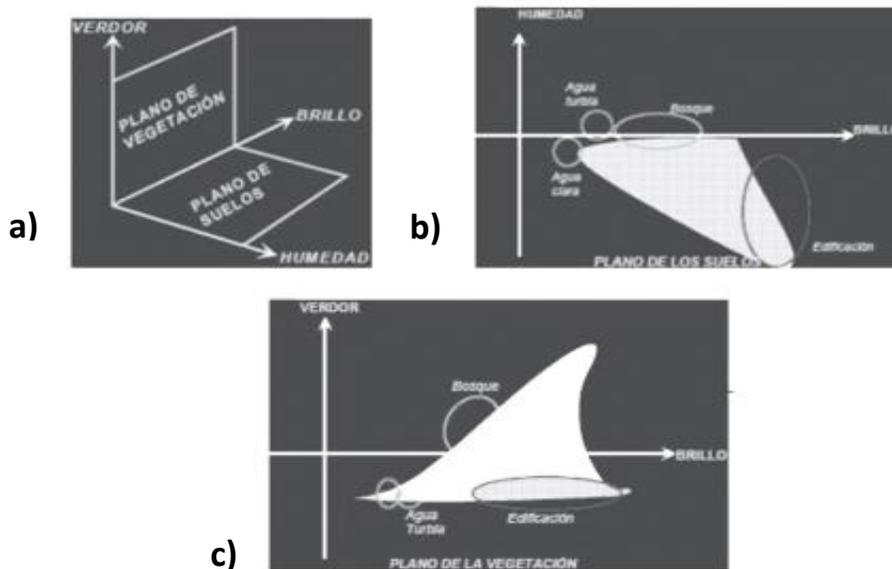


Figura 4. Planos de la Transformación Tasseled Cap (Chuvienco, 2002)

La combinación de estos ejes permite observar varios planos de variación, para el estudio de suelos y vegetación. En este sentido, suelen distinguirse tres planos: de vegetación, formado por el eje de brillo y de verdor, el de suelos, formado por el brillo y la humedad, y el de transición, formado por la humedad y el verdor (Figura 4a).

Lo que pretende el TC es poner en evidencia el comportamiento espectral de la vegetación y el suelo al crear nuevos ejes ajustados al espacio físico. Con la rotación de las imágenes originales se obtienen tres planos: brillo, verdor y humedad, los cuales están directamente asociados con valores físicos de la escena, donde el brillo está asociado a las variaciones de reflectancia del suelo, el verdor es similar a un índice normalizado de vegetación (NDVI) o mejor dicho, está correlacionado con el vigor de la vegetación, y la humedad se relaciona con la cantidad de agua contenida en la vegetación y el suelo (Figura 4b, 4c). Esta configuración de los planos permite tener mayor variabilidad entre los elementos vegetales de los que no lo son, y entre los suelos desnudos y la humedad contenida en ellos, por lo que los elementos urbanos son susceptibles a ser identificados (Seto *et al.*, 2002).

La utilidad de esta transformación se ha ampliado de los cultivos de seguimiento para el análisis y la representación cartográfica de la vegetación para apoyar una gran variedad de aplicaciones, como la silvicultura, la gestión de vegetación industrial, la representación cartográfica y la gestión de ecosistemas, el desarrollo urbano, y muchas más. También se ha ampliado el soporte de Landsat MSS para incluir otros sistemas de satélite populares, como Landsat TM y Landsat ETM, IKONOS y los sensores multiespectrales de alta resolución QuickBird (ESRI, 2013).

Las ecuaciones para generar las bandas de la Transformación Tasseled Cap son las siguientes:

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA
CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT
TM/ETM+/ OLI (1986-2014)

$$brillo = \sum_{k=1}^6 C_{kb}\rho_k$$

$$verdor = \sum_{k=1}^6 C_{kv}\rho_k$$

$$humedad = \sum_{k=1}^6 C_{kh}\rho_k$$

Donde C_{kb}, C_{kv} y C_{kh} son los coeficientes para obtener el brillo (b), verdor (v) y humedad (h), en la banda k.

Coeficientes para calcular Transformación Tasseled Cap según el sensor:

	B1	B2	B3	B4	B5	B7
Brillo	0.3037	0.2793	0.4743	0.5585	0.5082	0.1863
Verdor	-0.2848	-0.2435	0.5436	0.7243	0.0840	-0.1800
Humedad	0.1509	0.1973	0.3279	0.3406	-0.7112	-0.4572

**Tabla 2. Coeficientes propuestos para la obtención de TC a partir de
Landsat 5 – TM (Crist y Cicone, 1984)**

	B1	B2	B3	B4	B5	B7
Brillo	0.3561	0.3972	0.3904	0.6966	0.2286	0.1596
Verdor	-0.3344	-0.3544	0.4556	0.6966	-0.0242	-0.2630
Humedad	0.2626	0.2141	0.0926	0.0656	-0.7629	-0.5388

**Tabla 3. Coeficientes propuestos para la obtención de TC a partir de
Landsat 7 – ETM (Huang et al., 2002)**

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA
CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT
TM/ETM+/ OLI (1986-2014)

	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Brillo	0.3029	0.2786	0.4733	0.5599	0.508	0.1872
Verdor	-0.2941	-0.243	-0.5424	0.7276	0.0713	-0.1608
Humedad	0.1511	0.1973	0.3283	0.3407	-0.7117	-0.4559

**Tabla 4. Coeficientes propuestos para la obtención de TC a partir de
Landsat 8 – OLI (Muhammad et al., 2014)**

En el departamento de geografía de la universidad de Wisconsin, examinaron la relación que existe entre los componentes de la Transformación *Tasseled Cap* y los tipos de cobertura de un entorno urbano (Deng & Wu, 2012). Más específicamente, utilizaron una imagen Landsat ETM, donde se realizó un análisis de las características espectrales de diversas coberturas que se encuentran en una zona urbana (agua, vegetación, superficies impermeables brillosas y oscuras). Después, los tres componentes del TC (brillo, verdor y humedad) se normalizaron en un rango de 0 a 1. Esto se representó en tres gráficas, que se muestran a continuación.

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT TM/ETM+/ OLI (1986-2014)

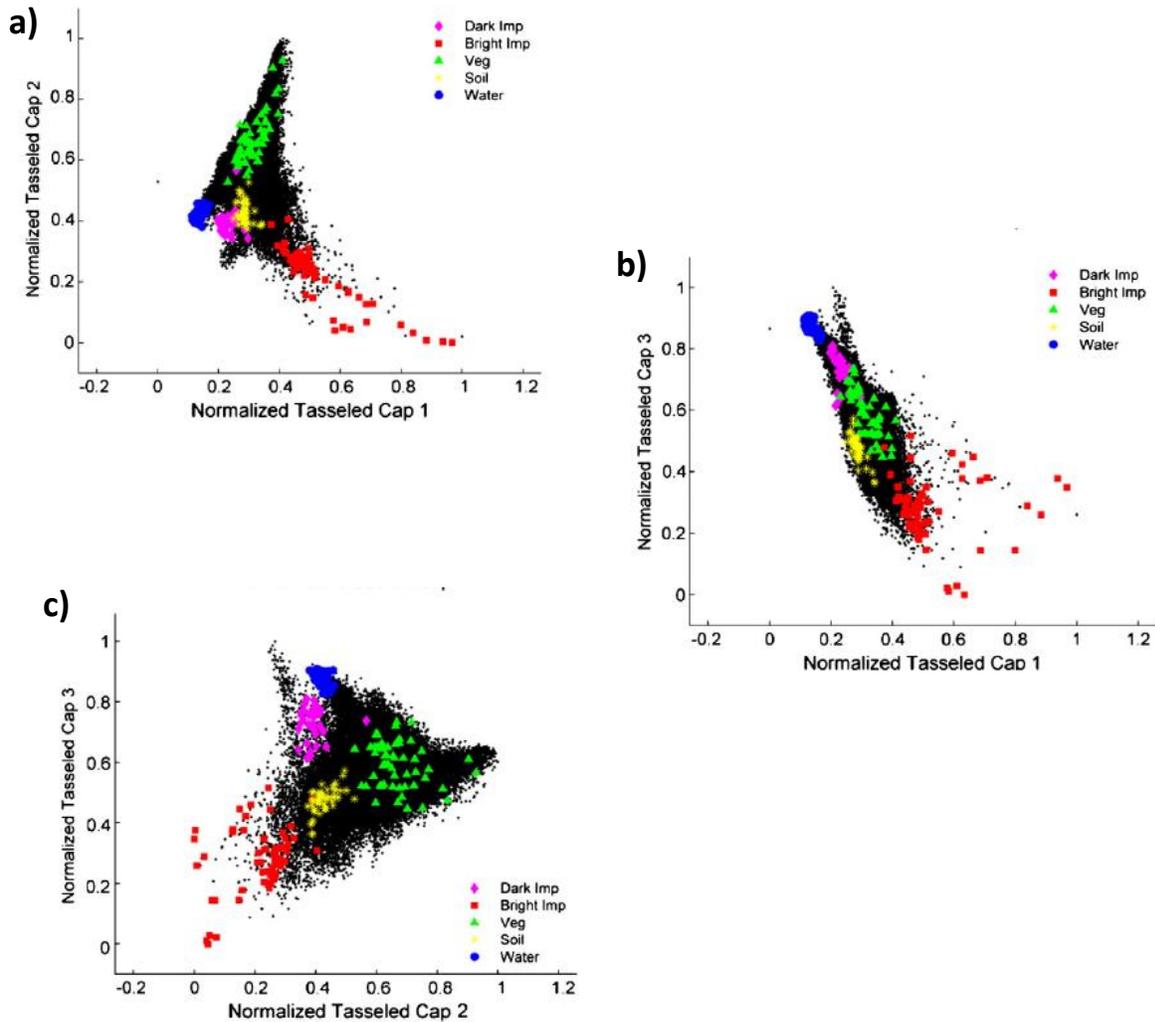


Figura 5: Diagramas de dispersión de las características de los componentes normalizados de TC superpuestos con la composición biofísica de un entorno urbano (Deng & Wu, 2012)

En la (Figura 5a), en el espacio de características TC1 y TC2, la vegetación, las superficies brillosas, el agua y las superficies oscuras ocupan tres vértices del triángulo, mientras que el suelo está agrupado con las superficies brillosas y oscuras, pero también se observa que el suelo está mezclado con las superficies oscuras. En el diagrama de TC1 y TC3 (Figura 5b), se observa una tira alargada en la que un extremo está ocupado por superficies brillosas, y el otro extremo de

la tira lo ocupa el agua y las superficies oscuras, mientras que en el centro se localiza la vegetación y el suelo. Por último en el diagrama de dispersión de TC2 y TC3 (Figura 5b) en los vértices del triángulo se localizan vegetación, superficies brillantes, el agua y las superficies oscuras.

En los diagramas de dispersión, se observa que los valores altos TC3 (Denominado humedad), no siempre corresponden a la mayor concentración de agua, como se observa en la (Figura 5b). También en las zonas rurales TC3 puede ser sensible a la humedad del suelo, a la vegetación y a cuerpos de agua, porque existen pocos materiales hechos por el hombre. En cambio, en las zonas urbanas existen valores bajos de humedad (TC3) en las superficies impermeables (por ejemplo, asfalto, carreteras, techos).

En esta investigación se llegó a la conclusión que las características físicas de los componentes de la transformación Tasseled Cap en un entorno urbano son las siguientes: TC1 (brillo) como de “alto albedo”, TC2 como vegetación, y TC3 (humedad) de “bajo albedo”. A través de este análisis espectral, queda demostrado que TC1 y TC3 están estrechamente relacionados con las superficies impermeables en un entorno urbano (Deng & Wu, 2012).

1.6 *Monitoreo espacio - temporal*

El monitoreo espacio - temporal ha cobrado gran auge por las ventajas que ofrece para la interpretación de imágenes satelitales; este monitoreo consiste en el seguimiento de procesos dinámicos. Al tratarse de información adquirida mediante la percepción remota, es una fuente de gran valor para estudiar cambios que se producen en la cubierta terrestre, como catástrofes naturales o alteraciones antropogénicas.

Las características orbitales de los satélites permiten que imágenes de la misma porción de tierra sean adquiridas periódicamente, facilitándose así cualquier estudio que requiera una dimensión temporal.

Este monitoreo espacio - temporal tiene por objeto la detección de cambios entre dos o más fechas diferentes, de modo tal que se pueda analizar la evolución del medio; este medio puede ser natural o antropogénico. En consecuencia, con este análisis se pueden planear las medidas adecuadas para evitar el deterioro o asegurar la conservación del medio.

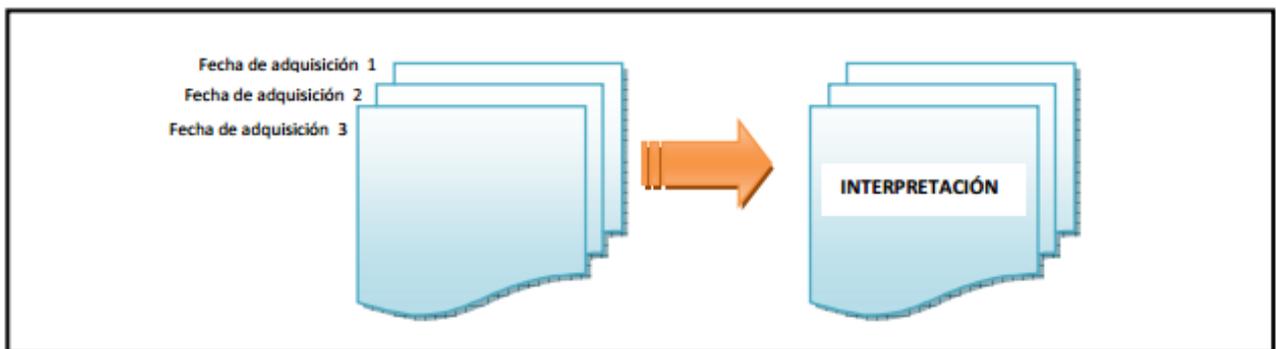


Figura 6: Monitoreo espacio temporal para la detección de cambio

Este monitoreo detecta cambios entre imágenes de satélite, estudiando el dinamismo temporal de una determinada zona; ejemplos de los cambios que puedan detectar este monitoreo son: crecimiento urbano, transformaciones agrícolas, obras de infraestructura, algunos son procesos muy lentos en el tiempo, como las transformaciones vegetales, o todo lo contrario suceden de un momento para otro, como un incendio. Asimismo, para evaluar las superficies afectadas por fenómenos naturales transitorios como en inundaciones, huracanes o erupciones volcánicas y la evolución de sus efectos.

También, este monitoreo permite obtener de forma rápida estimaciones de áreas cultivadas o generar mapas temáticos actualizados de las diferentes estructuras espaciales que son resultado del proceso de ocupación y uso de suelo.

1.7 Monitoreo espacio - temporal en zonas urbanas

En la actualidad existe más conciencia tanto de la importancia de estudiar y entender las relaciones que se originan en los procesos de intervención de la sociedad en la naturaleza, como de los graves problemas ambientales y los efectos económicos, sociales y ecológicos que resultan de estos procesos.

Entre las diferentes formas de alteración derivadas de la intervención del hombre sobre la naturaleza, los cambios en el uso y cobertura del suelo, están ligados a los procesos de urbanización, y son considerados una de las formas más severas de afectación de los ecosistemas (Watson et al., 2000). La urbanización es considerada en sí una de las fuerzas antropogénicas más poderosas y visibles sobre el planeta, cuya influencia sobre el medio ambiente se manifiesta a escalas local, regional y global. De hecho, las áreas urbanas densamente pobladas representan uno de los ambientes terrestres más alterados, debido a la forma y velocidad con las que se da el proceso de transformación de uso de suelo.

La urbanización ha traído cambios en la estructura interna de las ciudades. Las grandes urbes, junto a sus áreas metropolitanas son centros de innovación y de gestión política y económica, lo cual genera la concentración de la población.

Las áreas metropolitanas están integradas por una ciudad principal y un número variable de centros secundarios; las conurbaciones incluyen varios centros urbanos que se unen, y las megalópolis son el resultado de la unión de áreas metropolitanas y conurbaciones, que concentran a la población en aglomeraciones territoriales, parcialmente discontinuas, de enormes dimensiones.

El 54 por ciento de la población mundial actual reside en áreas urbanas y se prevé que para el 2050 llegara al 66 por ciento (ONU, 2014).

El crecimiento de la población urbana seguirá alentando por dos factores: la persistente preferencia de la gente de mudarse de áreas rurales a otras urbanas y el crecimiento de la población durante los próximos 35 años. Estos dos factores combinados añadirán 2.500 millones de personas a la población urbana para 2050” señaló Wilmoth, director de la División de Población del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la ONU.

Según el INEGI, en 1950 poco menos del 43% de la población en México vivía en localidades urbanas, en 1990 era el 71% y para 2010, esta cifra aumentó casi 78%.

Por esta razón, el monitoreo de la dinámica espacio - temporal de los ambientes urbanos es de gran importancia para entender los efectos de esta transformación, donde se puede observar la distribución, geometría, densidad y uso de suelo.

CAPITULO 2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

2.1 Zona Metropolitana de Mérida (ZMM)

La ciudad de Mérida y la región en torno a ella han jugado un papel estratégico en la Península de Yucatán desde su fundación 1542. Sin embargo, el crecimiento y desarrollo de ambas se consideró lento hasta principios de la década de 1980, cuando se empezaron a experimentar cambios radicales en su proceso de urbanización. Para esa fecha se empieza a delinear claramente la formación de una Zona Metropolitana (ZM), que hace referencia al conjunto de unidades político-administrativas que contiene el área urbana de una ciudad y a las zonas inmediatas integradas social y económicamente (Ducci, 1989).

La extensión de la ZMM está comprendida por los municipios de Mérida, Kanasín, Conkal, Ucú y Umán, pues estos municipios en torno a la capital reportaron la mayor concentración de población residente en el estado en el año 2000, con el 51.7% del total estatal. Esta delimitación fue desarrollada en 2004 de manera conjunta por la Secretaria de Desarrollo social (SEDESOL), el Consejo Nacional de Población (CONAPO) y e Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).

De acuerdo con el CINVESTAV “los cambios demográficos y económicos se han plasmado físicamente en las transformaciones del paisaje que se vuelve eminentemente urbano en la región, con contrastes de concentración y dispersión de población y servicios urbanos, entre otros” (CINVESTAV, 2006). Con la aparición del fenómeno de conurbación entre los municipios que rodean el centro, la mancha urbana de la ciudad de Mérida duplicó su tamaño de 1970 a 2000, según cálculos del INEGI, el uso residencial se ha desplazado del centro a la periferia y se ha deteriorado la infraestructura del centro.

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA
CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT
TM/ETM+/ OLI (1986-2014)

Mérida, Yucatán es una ciudad reconocida por su patrimonio cultural y por ser una de las ciudades más seguras del país. Esta ciudad constituye el centro más dinámico de la Península de Yucatán lo cual ha sido generado por altos ritmos de crecimiento poblacional y concentración, los cuales se han acelerado en las últimas décadas y han estructurado en gran medida la actual configuración urbana del territorio (Iracheta & Bolio, 2012).

2.2 Zona de estudio

El área de estudio es la Zona Metropolitana de Mérida (ZMM), localizada en el noroeste de la península de Yucatán, México. La ZMM está conformada por los municipios de Mérida, Umán, Kanasin, Conkal y Ucú (SEDESOL, CONAPO, INEGI, 2004).

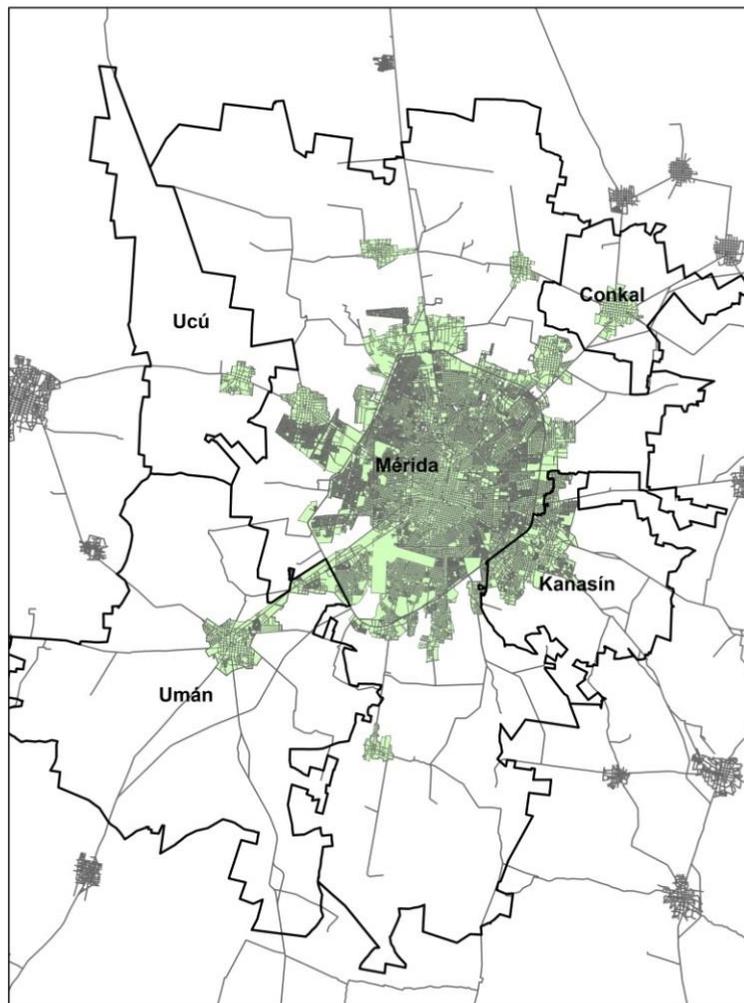


Figura 7. Mapa de limitación de la zona de estudio

2.3 Materiales

Para este estudio se decidió utilizar imágenes multispectrales adquiridas por diferentes sensores del satélite LANDSAT con resolución espacial de 30 m (Tabla 5).

Se escogió este satélite debido a las características espectrales, ya que la Transformación *Tasseled Cap* (TC), requiere de bandas específicas, otra ventaja es que la adquisición de las imágenes es gratuita a través del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS Global Visualization viewer) a través de la página (<http://glovis.usgs.gov/>).

Sensor	Path	Row	Fecha
Landsat-5 TM	20	45	13/03/1986
Landsat-5 TM	20	46	13/03/1986
Landsat-7 ETM+	20	45	6/11/2000
Landsat-7 ETM+	20	46	6/11/2000
Landsat-8 OLI	20	45	5/01/2014
Landsat-8 OLI	20	46	5/01/2014

Tabla 5 Datos de las imágenes Landsat adquiridas para la cuantificación de la composición biofísica. A partir de los 3 pares de imágenes por sensor, se crearon 3 mosaicos para los años 1986, 2000 y 2014 para el área de estudio

En cuanto a la necesidad de corrección de las imágenes empleadas en esta investigación, solamente fue necesario realizar dos tipos de correcciones: la radiométrica y la atmosférica. La corrección radiométrica es aquella que modifica los niveles digitales (ND) de una imagen satelital con el objetivo de acércalos a su valor real (Chuvienco, 2002), es decir, pasa los ND a valores de Radiancia. La

corrección Atmosférica se realizó mediante un módulo llamado *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of spectral Hypercubes* (FLAASH), incluido en el software ENVI 5.1, Dicha corrección está basada en el código de transferencia de radiación *MODerate resolution atmospheric TRANsmision* (MODTRAN), un programa informático diseñado para modelar la propagación atmosférica de la radiación electromagnética y recuperar la reflectancia espectral, donde se especifican los siguientes parámetros para las imágenes: atmosfera tropical, modelo de aerosol rural y el método de recuperación de aerosol de 2 bandas. La corrección atmosférica es necesaria para una buena estimación de las variables biofísicas como es la transformación *Tasseled Cap* y el BCI.

Posteriormente se realizaron recortes de las imágenes, esto con el fin de trabajar solamente con la porción que corresponde a los municipios de interés, procesar menos información y hacer mas rápido el procesamiento en los softwares ocupados.

2.4 Metodología

De manera ilustrativa en la figura 8, se presenta un diagrama que describe la metodología propuesta:

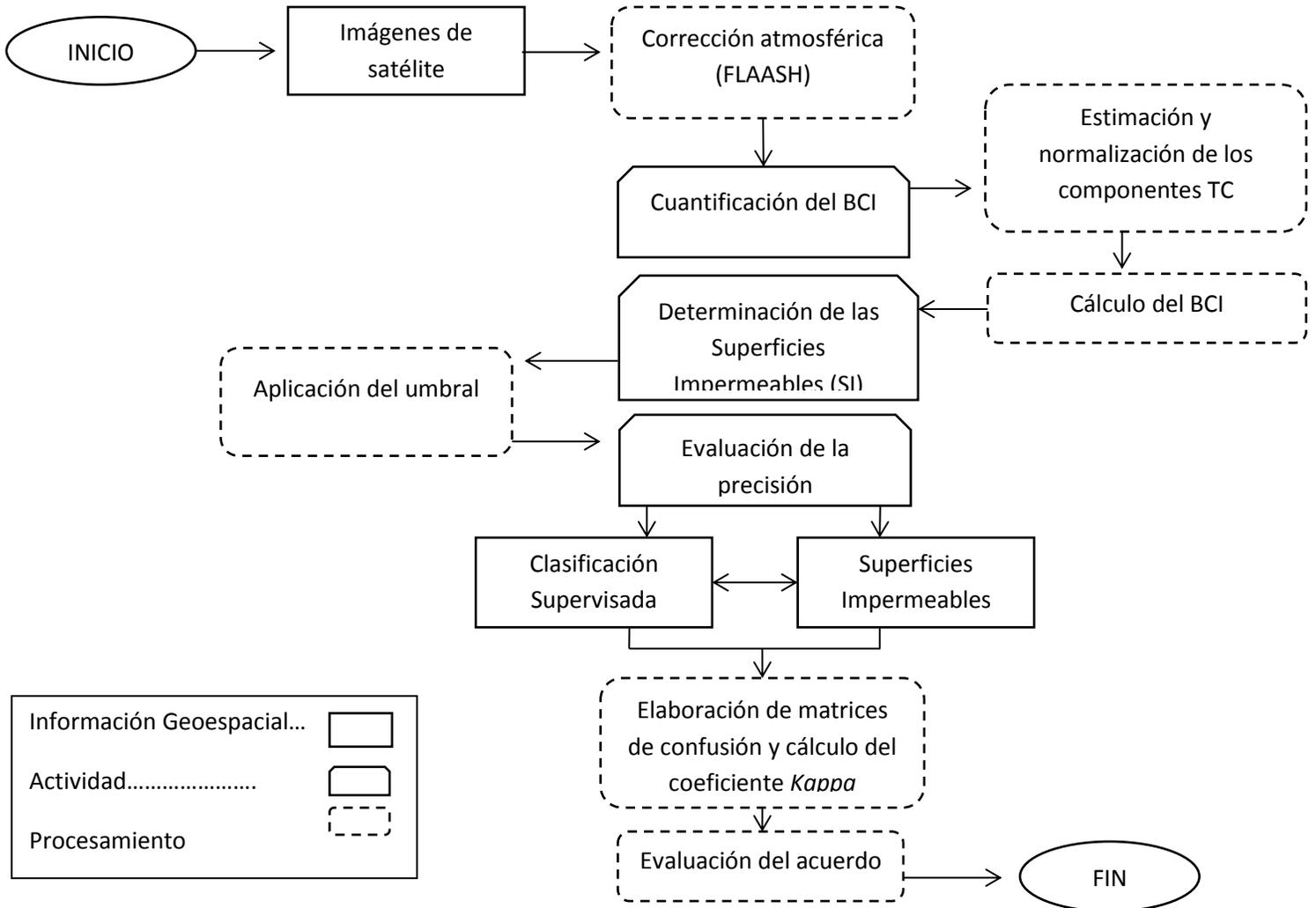


Figura 8. Diagrama de la metodología

Una vez obtenidas las superficies de reflectancia corregidas atmosféricamente, el procedimiento propuesto es el siguiente:

- a) Cuantificación de la Composición Biofísica. Consiste en la estimación y normalización de los componentes TC, para cada sensor de Landsat: TM (Figura 9a), ETM+ (Figura 9b) y OLI (Figura 9c), para posteriormente calcular el BCI de acuerdo con las ecuaciones del capítulo 1 TM (Figura 10a), ETM+ (Figura 10b) y OLI (Figura 10c) , donde se obtienen los tres tipos de coberturas (vegetación, suelos impermeables y suelos desnudos) que propone el índice.
- b) Determinación de la superficie impermeable. Es generada mediante la segmentación del BCI a partir del valor umbral desarrollado por Deng & Wu (2013), que separa las cubiertas de bajo y alto albedo a partir de valores mayores a -0.04(Figura 11).
- c) Evaluación de la precisión. Una vez obtenidos los resultados de las superficies impermeables resulta interesante reflejar de alguna manera cual es la fiabilidad de estos datos. Este proceso de verificación siempre requiere que comparemos nuestros resultados con una fuente externa, que se considere fiel representante de la realidad presente en el terreno en el momento de adquirir la imagen, pero esto no es posible siempre, el proceso de verificación requiere aplicar técnicas de muestreo de nos permitan estimar, con mayor exactitud y el menor coste posible, el error que contienen nuestros resultados (Chuvieco, 2012). Con el fin de evaluar la precisión se propuso una estrategia que combina las formas tradicionales de elaboración de matrices de confusión y el cálculo de concordancia *kappa* (Congalton, 1991). con la evaluación del acuerdo (Petropoulos et al., 2012), aplicada a las superficies impermeables (SI) estimadas a partir de la metodología propuesta y el resultado de una clasificación supervisada (CS)

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT TM/ETM+/ OLI (1986-2014)

mediante el método de máxima verosimilitud realizado a partir del set de imágenes Landsat empleadas en este trabajo.

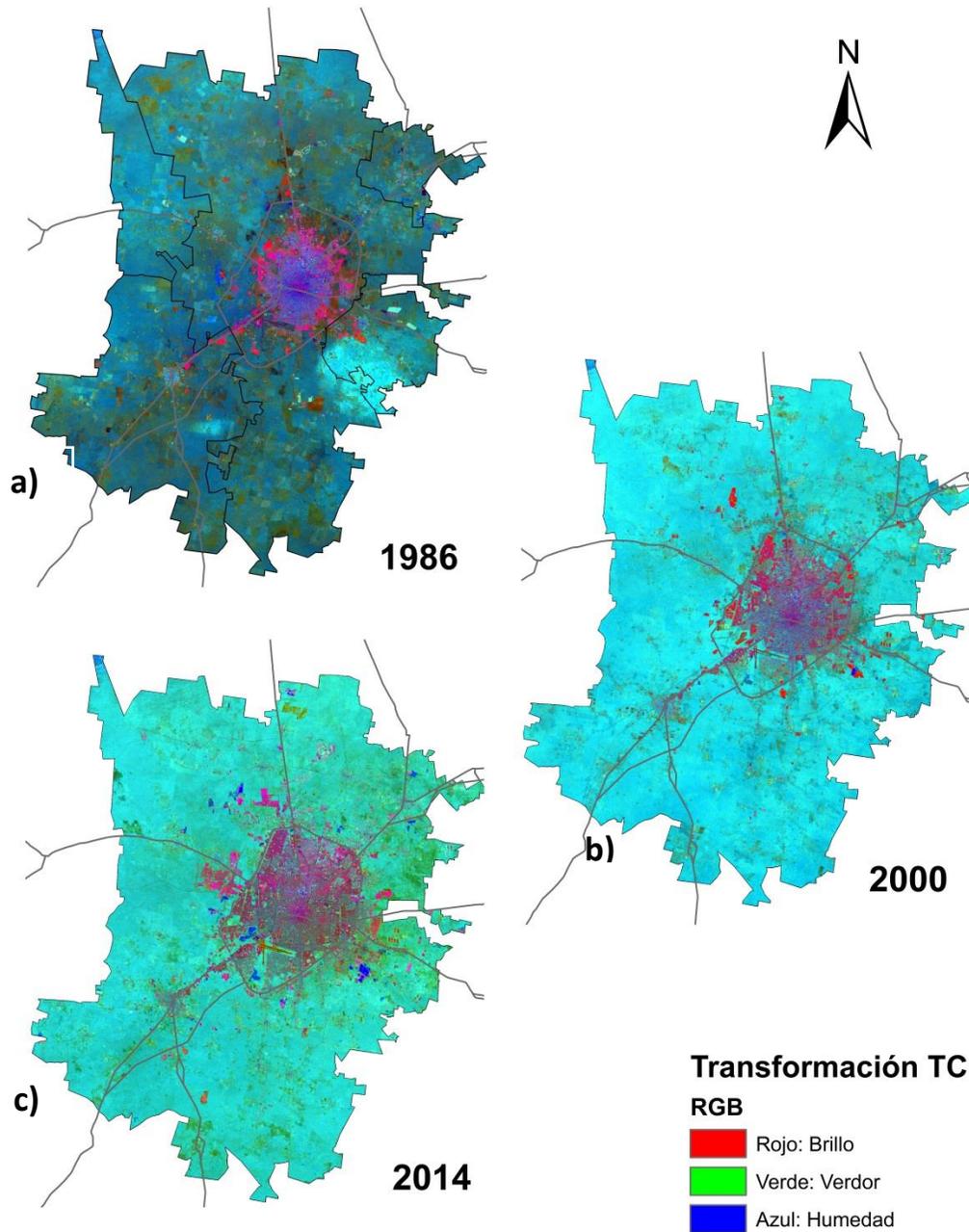


Figura 9. Combinación RGB de los Transformación Tasseled Cap donde, el color rojo corresponde al brillo, verde al verdor y azul a la humedad.

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT TM/ETM+/ OLI (1986-2014)

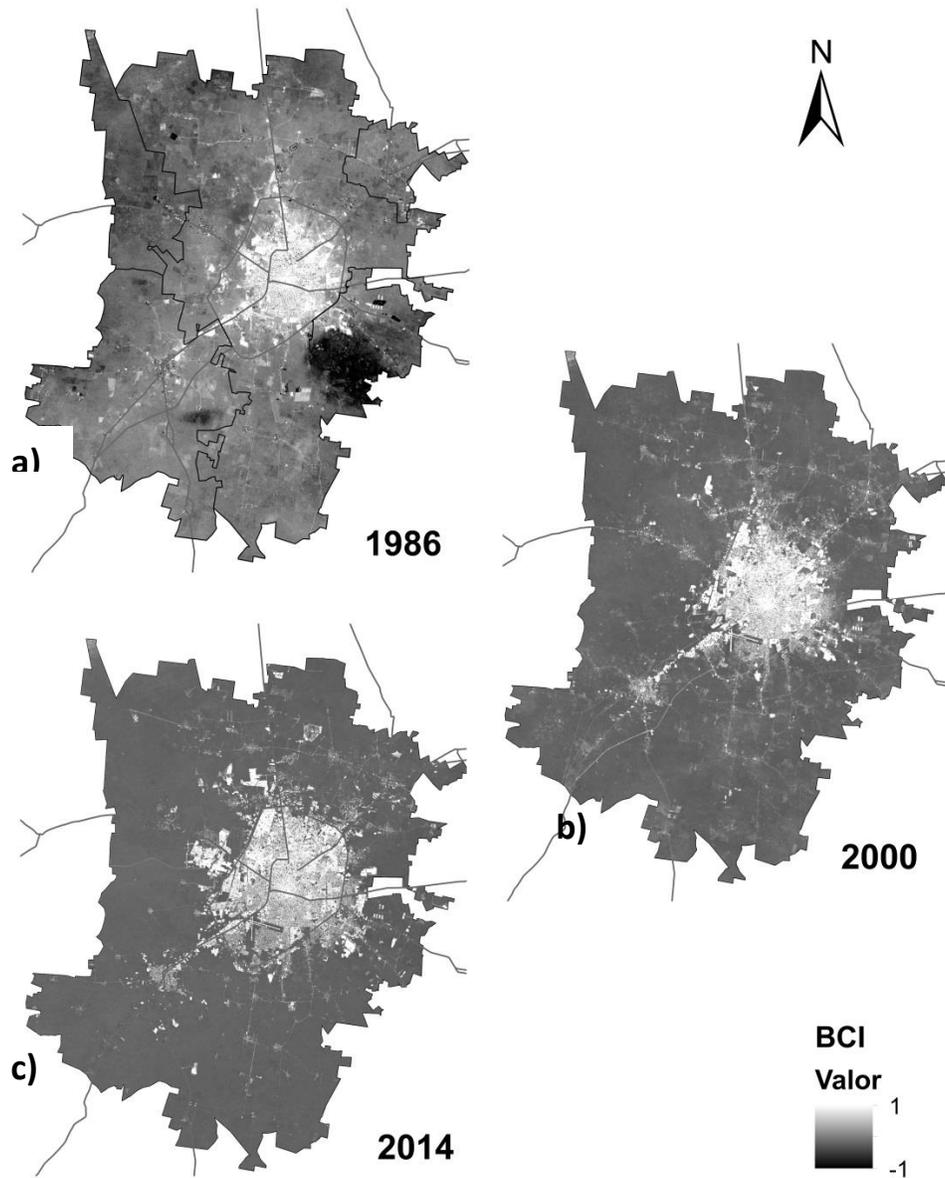


Figura 10. Derivación del BCI

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

3.1 Mapeo y caracterización de las Superficies Impermeables

De acuerdo con la metodología propuesta, los resultados de la extensión de la superficie impermeable estimada para la Zona Metropolitana de Mérida son los siguientes: 6 788 ha para el año de 1986 (Figura 11a); 15 872 ha para el 2000 (Figura 11b); y 21 716 ha para 2014 (Figura 11c).

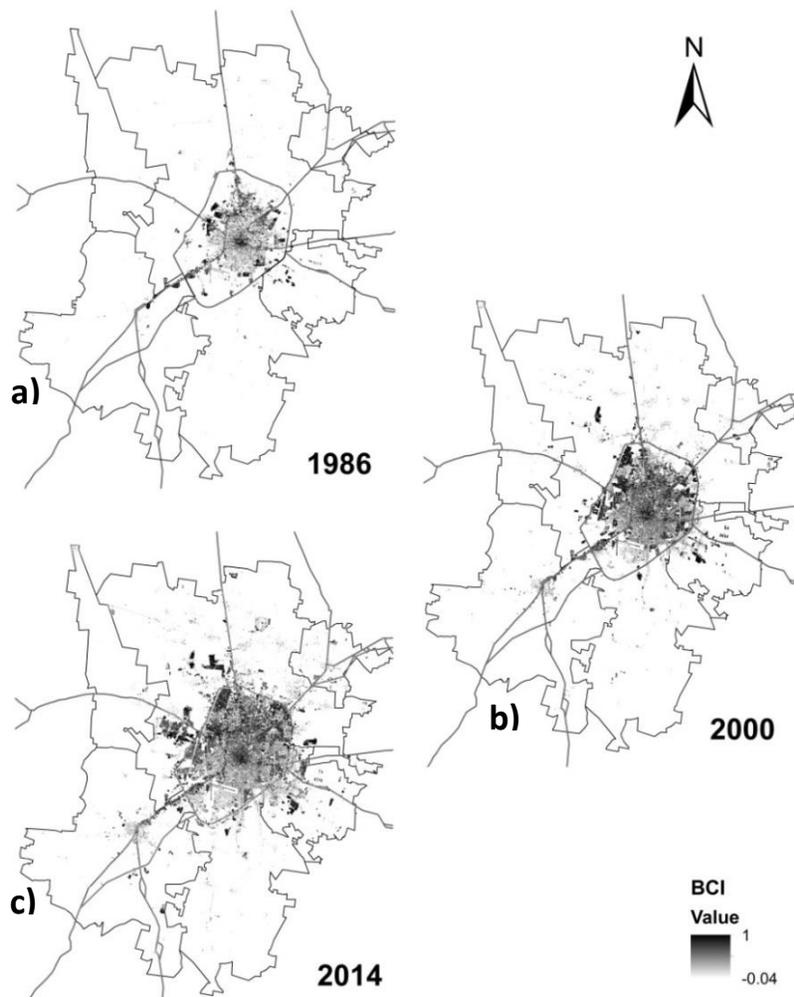


Figura 11. Derivación de las Superficies Impermeables

Estos resultados se representan graficamente (Figura 12).

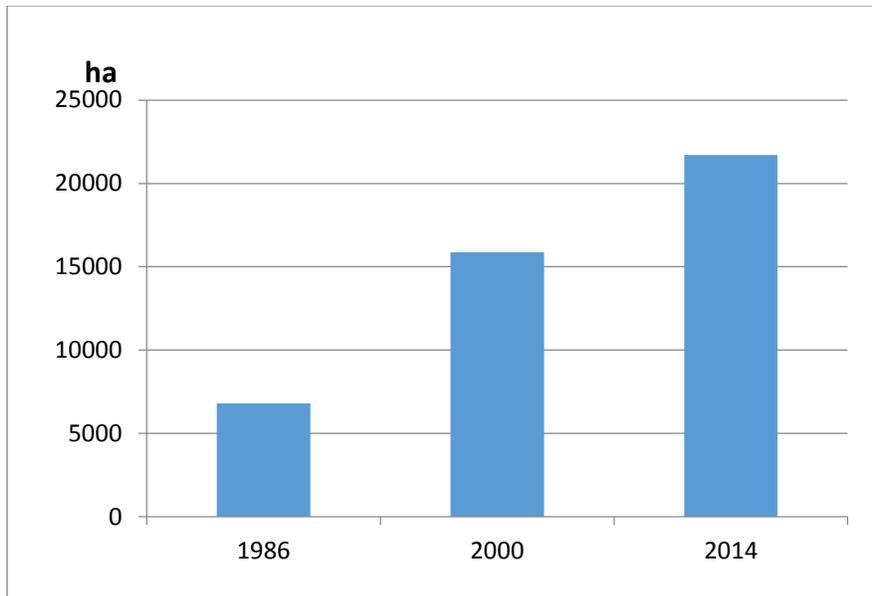


Figura 12. Crecimiento de las superficies impermeables

El crecimiento de las superficies impermeables durante el periodo 1986 – 2000 fue del 130% , para el periodo 2000 – 2014 fue del 36%. Lo anterior significa que el crecimiento urbano durante el primer periodo analizado 1986 – 2000 representa el 61% del total de la extensión de la superficie impermeable de la zona de estudio. Por otra parte, para todo el periodo analizado 1986-2014, la tasa promedio de crecimiento de la superficie impermeable fue de 529 ha/ año.

De la misma manera, el valor del BCI cuantificado para las superficies impermeables estimadas presenta una tasa mayor de cambio para el primer periodo de crecimiento, al pasar de 0.08349 en 1986 a 0.09508 en 2000; mientras que el valor promedio del BCI para la superficie impermeable estimada en 2014 es de 0.09737, lo que significa apenas un pequeño incremento en la composición biofísica de los ambientes urbanos de la ciudad, para el periodo de 2000-2014.

Tanto los resultados sobre la extensión de la ciudad a partir de la aplicación de un umbral, así como el mapeo al interior de su composición biofísica, pueden ser de ayuda para aproximar la cuantificación de la superficie impermeable al entendimiento de las ciudades mediante la definición de zonas características en las ciudades que permite identificar diferentes tipos de comportamiento urbano según su densidad, diversidad, movilidad, configuración, uso de recursos e infraestructura. Estas zonas son denominadas lugares-tipo, e incluyen edificaciones, calles y espacios públicos, y son definidas con base en los tamaños de lote, manzanas, densidad, mezcla de usos de suelo, población, vivienda, oportunidades de empleo cercanas y proporción de vialidades (*Calthorpe Associates*, 2015).

En este trabajo se toman como referencia los resultados del reconocimiento de lugares-tipo para la ZMM obtenidos por el Centro Mario Molina (2014) para la identificación de grupos de características similares asociados a nivel de colonia. Los lugares-tipo son definidos a partir de la definición de zonas características de la ciudad y a diferencia de un análisis convencional de usos de suelo, los lugares-tipo describen colonias a partir de sus características geométricas, demográficas y, en función de la demanda de recursos y energía para la ciudad. Los procedimientos de selección, caracterización y clasificación de los lugares-tipo para la ZMM se desarrollaron de acuerdo con los siguientes criterios.

- Selección de información geoestadística para el análisis de las condiciones urbanas dentro de la zona metropolitana, entre las que se incluyen: costos de suelo por colonia, patrones de consumo de recursos (específicamente consumo de agua), factores socioeconómicos (en los que se utilizaron los índices de marginación y los porcentajes de motorización como principales indicadores) y usos de suelo, entre otros.

- Identificación de sitios de referencia y sobreposición de capas de información, relacionadas al consumo de recursos (agua, gas y electricidad) y a la demanda de transporte (distancia a centros de trabajo, tiempo, modo de traslado y costo).
- Clasificación a partir de la metodología Caras de Chernoff (Huff *et al.*, 1981) para la generación de seis tipos diferentes asociados a colonias, los cuales, posteriormente, se agruparon en tres categorías según su condición central, intraurbano y periurbano.

La clasificación por categorías de los tres lugares-tipo, incluyen la categoría Central asociada a colonias de niveles socioeconómicos medios con acceso a equipamiento y servicios; la categoría Intraurbano incluye colonias de todos los niveles socioeconómicos con cobertura de equipamientos y servicios. Mientras que la categoría Periurbana incluye también colonias con todos los niveles socioeconómicos pero con baja cobertura de equipamientos y servicios.

–

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA
CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT
TM/ETM+/ OLI (1986-2014)

A continuación se muestran las colonias seleccionadas de acuerdo con su categoría y un mapa de ubicación (Tabla 6, Figura 13).

Categorías	Colonias
Central	<ul style="list-style-type: none"> • Centro • Mayapan • Dolores Otero
Intraurbana	<ul style="list-style-type: none"> • México Norte • Col. México • Campestre • Chuburná • Fco. Montejo • Yucalpetén • Vergel II • Lindavista • Obrera • Serapio Rendón
Periurbana	<ul style="list-style-type: none"> • Cd. Caucel • San haroldo • Emiliano Zapata Sur • Dzununcán

Tabla 6. Colonias clasificadas por lugares tipo (Centro Mario Molina, 2014)

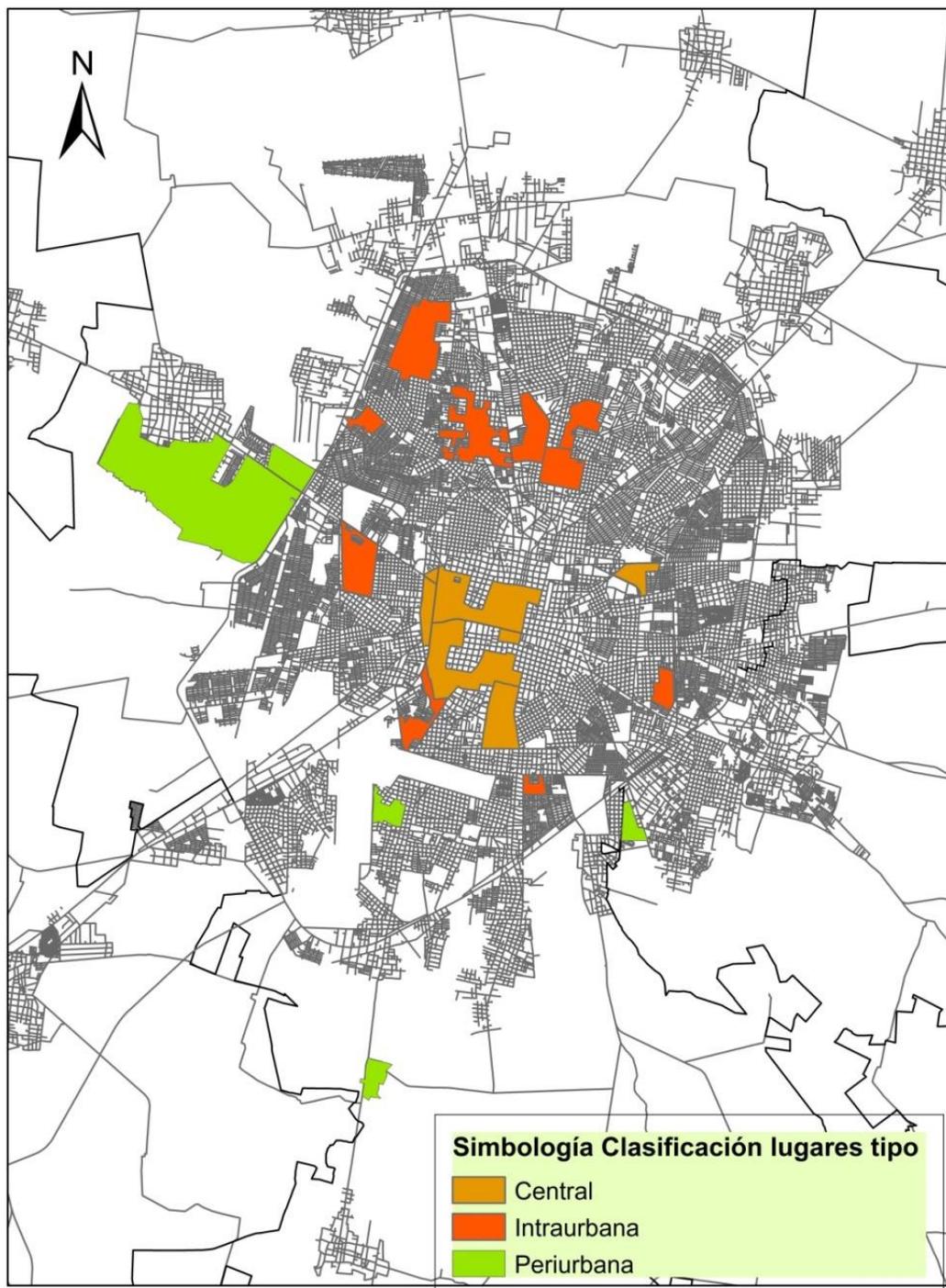


Figura 13. Mapa de ubicación de los lugares tipo

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT TM/ETM+/ OLI (1986-2014)

A partir de esta selección de lugares tipo de acuerdo con las categorías descritas arriba, se obtuvieron las estadísticas del BCI de los tres años de análisis para cada colonia, con el objetivo de conocer su comportamiento a través de los años (Figura 14).

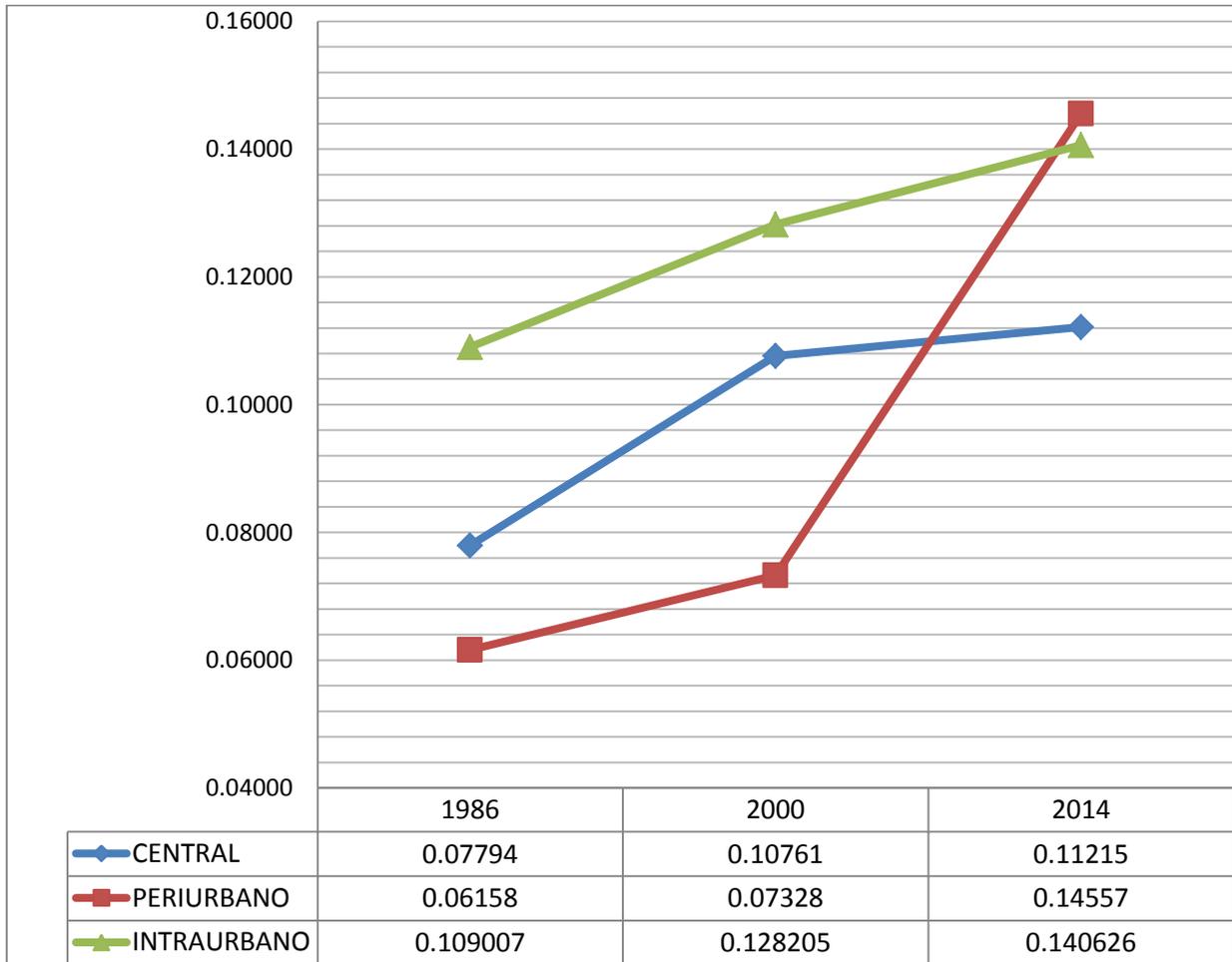


Figura 14 . Comportamiento del BCI para las colonias clasificadas como lugares tipo para la serie de tiempo analizada

Como se observa en la Figura 14, durante el primer periodo de estudio, las categorías central e intraurbano muestran la mayor tasa de consolidación de la superficie urbana respectivamente; mientras que para el segundo periodo de análisis es la categoría periurbano la que muestra una mayor tasa de consolidación, lo que incluso muestra que para 2014 tanto las colonias intraurbanas como periurbanas muestran una composición urbana similar., Los resultados de las colonias periurbanas reflejan un valor alto de BCI, debido a la influencia de los desarrollos urbanos de ciudad Caucel I y II, la primer ciudad satélite de Mérida. Esta zona ubicada al poniente de la ciudad central y cuyo desarrollo inició 2004, está caracterizada por grandes extensiones de casas habitacionales de alta densidad que cuentan con servicios y equipamiento como centros comerciales, negocios, supermercados y escuelas. Para el año 2014 esta zona alcanzo una superficie de 771 hectáreas de construcción, lo que permite explicar en gran medida los altos valores de BCI reportados en este trabajo.

3.2 Evaluación de la precisión del mapeo de las Superficies Impermeables

Con el fin de evaluar la precisión en el mapeo de las superficies impermeables obtenidas, se propuso una estrategia que combina las formas tradicionales de elaboración de matrices de confusión y cálculo del coeficiente de concordancia kappa (Congalton, 1991) con la evaluación del acuerdo (Petropoulos *et al.*, 2012), aplicada a las superficies impermeables (SI) estimadas a partir de la metodología propuesta y el resultado de una clasificación supervisada (CS) mediante el método de máxima verosimilitud realizado a partir de los datos multiespectrales del set de imágenes Landsat empleadas en este trabajo, que servirá como referencia para poder evaluar los resultados de las superficies impermeables obtenidas con el índice. La clasificación supervisada, permite delimitar sobre la imagen un área piloto, que se considera suficientemente representativa de las superficies

impermeables y el método de máxima verosimilitud que asemeja la distribución real de los niveles digitales (ND) en una clase específica, por lo que sirve para calcular la probabilidad de que un pixel (con un determinado ND) sea miembro de ella (Chuvienco, 2002).

Para el caso de las imágenes Landsat ETM+ y OLI, se emplearon las imágenes pancromáticas para la selección de 1000 puntos al azar correspondientes con las clases superficie impermeable y otros; mientras que para la imagen Landsat TM se emplearon composiciones a color de los datos originales para su mejor interpretación; y en todos los casos la interpretación se auxilió de los resultados de superficies urbanas para 1980, 2000 y 2014 reportados por Iracheta (2015). Los resultados obtenidos indican valores de confiabilidad global para las SI de 86.0%, 90.1% y 86.1% (Figura 15a), mientras que para el caso de las CS los valores de confiabilidad global alcanzados fueron de 74.6%, 87.2% y 87.6% (Figura 15b) para Landsat TM, ETM+ y OLI respectivamente en ambos casos. Con respecto del coeficiente kappa que es un indicador que mide la concordancia que hay entre las concordancias observadas y las esperadas al azar (Chuvienco, 2012) los valores para las SI fueron de 0.7200, 0.8020 y 0.7220 con una varianza de 0.0015; mientras que para las CS los valores fueron de 0.4920, 0.7440 y 0.7520 con una varianza de 0.0146. El valor para las SI que tiene mayor fuerza de concordancia, es Landsat 7 ETM+, mientras que para la CS es Landsat OLI. De igual manera la evaluación de la precisión propuesta nos indica que la mejor exactitud de los resultados en el caso de SI fueron para Landsat ETM+ y en el caso de CS es para Landsat OLI.

A continuación se presentan las matrices de confusión (Figura 15), para la obtención de la confiabilidad global, para superficies impermeables y clasificación supervisada:

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT TM/ETM+/ OLI (1986-2014)

a) Superficies Impermeables

b) Clasificación Supervisada

		Sensor TM									
		Referencia				Referencia					
			1	2	Total		1	2	Total		
Usuario	1		429	69	498	Usuario	1	350	104	454	
	2		71	431	502		2	150	396	546	
		Total	500	500	86.00%			Total	500	500	74.60%

		Sensor ETM+									
		Referencia				Referencia					
			1	2	Total		1	2	Total		
Usuario	1		402	1	403	Usuario	1	373	1	374	
	2		98	499	597		2	27	499	626	
		Total	500	500	90.00%			Total	500	500	87.20%

		Sensor OLI									
		Referencia				Referencia					
			1	2	Total		1	2	Total		
Usuario	1		411	50	461	Usuario	1	460	84	544	
	2		89	450	539		2	40	416	456	
		Total	500	500	86.10%			Total	500	500	87.60%

Figura 15. Matrices de confusión

Para la evaluación del acuerdo se obtuvieron tres parámetros: Eficiencia de área detectada (DAE), error de comisión (FAR), y error de omisión (SAR). (Scott *et al.*, 2014). Derivados a partir de las siguientes ecuaciones:

$$DAE = \frac{DIA}{DIA + SIA}$$

$$FAR = \frac{FIA}{DIA + FIA}$$

$$SAR = \frac{SIA}{DIA + SIA}$$

Donde DIA es el área impermeable común entre la SI y la CS, SIA es el área impermeable incluida en CS, pero no en la SI, y FIA es el área impermeable generada por la SI, pero no por la CS. Los datos obtenidos se muestran a continuación (Tabla 7):

A continuación se presentan los datos obtenidos

	1986	2000	2014
DAE	50.7%	82.2%	78.8%
FAR	0.0%	0.0%	0.0%
SAR	49.3%	17.8%	21.2%

Tabla 7. DAE, FAR Y SAR en valores porcentuales, para las tres fechas de Landsat

Como se observa en la tabla los mejores resultados se obtienen para Landsat 7 con un DAE de 82.2%. Este resultado coincide con la mayor confiabilidad calculada para ambas estrategias y con el hecho de ser Landsat ETM+ el sensor sobre el cual se propuso el valor del umbral empleado en este trabajo para llevar a cabo la segmentación. Para FAR (error de comisión), se observa que las superficies impermeables estimadas, para las 3 fechas, no ocupan mayor superficie que la de la clasificación supervisada.

En cuanto a la precisión de los sensores, el que mejor exactitud tuvo fue Landsat 7, esto puede deberse a que el umbral que se ocupó fue diseñado para este mismo sensor.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

La ciudad de Mérida como varias ciudades en el país muestra un proceso de expansión urbana acelerado hacia la periferia, llevando de la mano mayores recorridos para sus ciudadanos y la necesidad de mayor infraestructura vial, equipamiento urbano, servicios, etc.

Los resultados del presente trabajo muestran la cuantificación de las superficies impermeables para la zona metropolitana de Mérida, que nos ofrece un panorama de cómo la Ciudad se ha ido transformando a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos durante el primer periodo de análisis 1986-2000, muestran el aumento de la extensión de la ciudad está asociado a un mayor incremento en el valor de la composición biofísica de las colonias tipificadas como central intraurbanas, mientras que, para el periodo 2000-2014, el aumento en la extensión está asociado a las colonias periurbanas, logrando estas alcanzar valores similares a los de las colonias intraurbanas.

En cuanto a la evaluación de la precisión, los resultados obtenidos fueron evaluados a partir de una estrategia que combina la elaboración de matrices de confusión así como la aplicación de métodos para la evaluación del acuerdo; construyendo con ello mayores elementos de certeza a las estimaciones realizadas. No obstante la evaluación de la precisión de este tipo de información, continúa siendo un tema de interés en el ámbito de la percepción remota.

En general, la metodología propuesta se muestra como una herramienta eficaz, conveniente y barata para el mapeo de las superficies impermeables, además de que puede tener un gran potencial para diferentes estudios sobre algunos elementos constitutivos de la estructura urbana, como lo es la gestión, planificación y modelado de estos ambientes.

Durante el desarrollo de este trabajo, tuve la oportunidad de asistir como ponente a la **XXI Reunión Nacional del Capítulo SELPER-México-UACJ 2015**, que se llevó acabo del 12 al 16 de agosto del año 2015, en la Universidad de Ciudad Juárez, Chihuahua lo que posteriormente me dio la oportunidad que el trabajo fuera aceptado para ser incluido en un volumen especial de la XXI-SELPER-MÉXICO-UACJ-2015, que será publicado en este año (2016).

BIBLIOGRAFÍA

- *Arnold Jr, C. L., & Gibbons, C. J. (1996). Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. Journal of the American planning Association, 62(2), 243-258.*
- *Barrios J.C. (2009). "Ecosistemas Urbanos", Revista ambienta., pp.1-5.*
- *Chuvienco, S (2002). Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Ariel, Madrid.*
- *Chuvienco, S. (2012). Teledetección ambiental. La observación desde la tierra en el espacio. Ariel, Madrid.*
- *CINVESTAV, 2006. "La Zona Metropolitana y la Aglomeración Urbana de la Ciudad de Mérida a principios del siglo XXI. México".*
- *Congalton, R. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, Remote Sensing of Environment, 37:35-46.*
- *Crist, E. P., & Cicone, R. C. (1984). A physically-based transformation of Thematic Mapper data---The TM Tasseled Cap. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, (3), 256-263.*
- *Deng, C., & Wu, C. (2012). BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environments. Remote Sensing of Environment, 127, 247-259.*
- *Deng, C., & Wu, C. (2013). Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: A spectral unmixing and thermal mixing approach. Remote Sensing of Environment, 131, 262-274.*
- *Ducci, M. E. (1989). Introducción al urbanismo: conceptos básicos. Trillas.*
- *Flanagan, M., & Civco, D. L. (2001, April). Subpixel impervious surface mapping. In Proceedings of the 2001 ASPRS Annual Convention, St. Louis, MO, April (Vol. 23).*

- Huang, C., Wylie, B., Yang, L., Homer, C., & Zylstra, G. (2002). *Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance*. *International Journal of Remote Sensing*, 23(8), 1741-1748.
- Huff, D. L., Mahajan, V., & Black, W. C. (1981). *Facial representation of multivariate data*. *The Journal of Marketing*, 53-59.
- Iracheta, A. (2015). *Ciudad compacta-ciudad difusa: Nota para el debate*. En *Ciudad Compacta, del concepto a la práctica* (Ed. Quiroz, H.). Universidad Nacional Autónoma de México. p. 233-266.
- Lee, K., (2007). "An urbanizing world. In: O'Meara, S.M. et al. *State of the World. Our urban future*", New York, The World Watch Institute/W.W.Norton & Company.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2014). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Mohapatra, R. P., & Wu, C. (2008). *Subpixel imperviousness estimation with IKONOS imagery: an artificial neural network approach* (pp. 21-37). Taylor & Francis Group: London, UK.
- Muhammad H., Zhang, L., Shuai, T., & Tong Q. (2014). "Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at satellite reflectance", *Remote Sensing Letters* (pp. 422-431).
- Petropoulos, G. P., Kontoes, C. C., & Keramitsoglou, I. (2012). *Land cover mapping with emphasis to burnt area delineation using co-orbital ALI and Landsat TM imagery*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 344-355.
- Ridd, M. K. (1995). *Exploring a VIS (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities†*. *International journal of remote sensing*, 16(12), 2165-2185.
- SEDESOL, CONAPO e INEGI, 2004. "Delimitación de las zonas metropolitanas de México", Primera edición, Secretaría de Desarrollo

Social, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.

- Seto, K. C., Woodcock, C. E., Song, C., Huang, X., Lu, J., & Kaufmann, R. K. (2002). *Monitoring land-use change in the Pearl River Delta using Landsat TM. International Journal of Remote Sensing*, 23(10), 1985-2004.
- Scott, D., Petropoulos, G. P., Moxley, J., & Malcolm, H. (2014). *Quantifying the physical composition of urban morphology throughout Wales based on the time series (1989–2011) analysis of Landsat TM/ETM+ images and supporting GIS data. Remote Sensing*, 6(12), 11731-11752.
- Watson, R. T., I. R. Noble, N. H. Ravindranath, D. J. Verardo & D. J. Dokken, (2000). “*Special Report on Land Use, Land-use Change and Forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change*”-
- Weng, Q. (2012). *Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. Remote Sensing of Environment*, 117, 34-49.
- Wickham, J. D., Stehman, S. V., Gass, L., Dewitz, J., Fry, J. A., & Wade, T. G. (2013). *Accuracy assessment of NLCD 2006 land cover and impervious surface. Remote Sensing of Environment*, 130, 294-304.
- Wu, C., & Murray, A. T. (2003). *Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. Remote sensing of Environment*, 84(4), 493-505.
- Yang, F., Matsushita, B., Yang, W., & Fukushima, T. (2014). *Mapping the human footprint from satellite measurements in Japan. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 88, 80-90.
- ESRI, 2013. “*Función Tasseled Cap*”. <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//009t0000024t000000> consulto Julio 2015.

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA
CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT
TM/ETM+/ OLI (1986-2014)

- ONU, 2014. “Departamento de asuntos económicos y sociales”.
<http://www.un.org/es/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html> consultado Julio 2015.