



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Análisis del cambio de uso de  
suelo con metodología de  
Percepción Remota. Caso de  
estudio subcuenca Chalco –  
Xochimilco**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Geofísico**

**P R E S E N T A**

Heber Antonio Pacheco Silva

**DIRECTORA DE TESIS**

M.C.T. Alejandra Selene Membrillo Abad



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

Agradezco profundamente a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y a la Facultad de Ingeniería por brindarme la oportunidad de formarme como profesional. Mi paso por la universidad ha sido una experiencia inigualable e inolvidable, llena de aprendizaje, crecimiento y descubrimiento.

Agradezco a mis profesoras y profesores que me formaron y que fueron parte del proceso, en particular a la M.C. Alejandra Membrillo, quien como directora de tesis dedicó mucho tiempo y me inspiró en estos temas que ahora forman parte de mi vida profesional. A cada uno de mis sinodales, por sus valiosos comentarios, tiempo y orientación para mejorar mi trabajo.

Quiero expresar mi gratitud a mis padres, Víctor Pacheco y María de Lourdes Silva, por brindarme una educación y por el amor, por el apoyo incondicional que me han dado siempre y por enseñarme a ser fuerte y perseverante. También quiero agradecer a mi hermano Víctor M. Pacheco por su ayuda e inspiración para estudiar ingeniería. A toda mi familia, gracias por estar conmigo siempre.

Quiero agradecer a Citlalli Medina y su familia por el respaldo constante y ánimos para el término de esta etapa.

También quiero expresar mi gratitud a mis amigos Axel Acevedo y Marlén Sta. Cruz por los buenos y malos momentos compartidos, el apoyo vivido durante la carrera, durante las prácticas de campo, en las tareas y exámenes.

Quiero agradecer a América Román por su confianza (por darme la primera oportunidad) y por la amistad. A la subdirección de geografía del INEGI en Baja California por hacerme sentir parte de su familia. En especial, quiero agradecer a Daniel Otero, no tengo palabras para expresar mi gratitud por brindarme un lugar cálido y seguro lejos de casa. Gracias por tu generosidad y bondad. A Pedro Rocha y Fernando Contreras por ser inspiración y apoyo, por sus ánimos para la finalización de esta tesis. Son parte importante de mi vida profesional.

# Índice

<i>Resumen</i>	5
<i>Abstract</i>	6
<i>Introducción</i>	7
<i>Justificación</i>	9
<i>Objetivos</i>	10
<i>Fundamentos teóricos</i>	11
<b>Percepción Remota</b>	11
Espectro electromagnético	12
Interacción con la atmósfera	13
Interacción con la superficie	14
Reflectancia	15
<b>Plataformas y sensores</b>	16
Landsat	16
<b>Procesamiento de imágenes satelitales</b>	17
Resolución de imágenes	18
Corrección atmosférica	18
Realce espectral	19
Clasificación supervisada	19
Evaluación del error	20
<i>Zona de estudio</i>	22
<b>Cuenca Tectónica de México (CTM)</b>	22
<b>Ciudad de México y la Zona Metropolitana</b>	23
<b>Subcuenca Chalco – Xochimilco</b>	25
Importancia agroalimentaria	29
<b>Zonificación Geotécnica</b>	32
<i>Metodología</i>	36
<i>Resultados</i>	41
<b>Análisis de resultados</b>	57
<i>Conclusiones</i>	63
<i>Recomendaciones</i>	66
<i>Referencias</i>	68

## Figuras

Figura 1. Componentes eléctrico (E) y magnético (H) de la radiación electromagnética	12
Figura 2. Espectro electromagnético	13
Figura 3. Línea del tiempo de las misiones Landsat desde 1972	16
Figura 4. Propiedades básicas de los datos de imágenes digitales multiespectrales.	17
Figura 5. Mapa de ubicación de la zona de estudio en la subcuenca de Chalco-Xochimilco	26
Figura 6. Mapa de polígonos de ANPs y SC de la zona de estudio	28
Figura 7. Mapa de Zonificación Geotécnica para la subcuenca Chalco – Xochimilco	33
Figura 8. Histograma antes y después de la corrección atmosférica	41
Figura 9. Composiciones a falso color	44
Figura 10. Resultado de clasificación supervisada para el año de 1973	48
Figura 11. Resultado de clasificación supervisada para el año de 1989	49
Figura 12. Resultado de clasificación supervisada para el año de 2020	50

## Gráficas

Gráfica 1. Población de la Ciudad de México y municipios conurbados de 1950 a 2020	23
Gráfica 2. Firma espectral de vegetación tomada en laboratorio	38
Gráfica 3. Porcentaje de superficie por clase para cada año de análisis en el área de estudio	55
Gráfica 4. Porcentaje de superficie por clase para cada año de análisis en Áreas Naturales Protegidas	56
Gráfica 5. Porcentaje de superficie por clase para cada año de análisis en Suelo de Conservación	56

## Tablas

Tabla 1. Superficie en hectáreas por Zona Geotécnica en el área de estudio	34
Tabla 2. Características plataformas y sensores utilizados en el estudio de la subcuenca Chalco-Xochimilco	36
Tabla 3. Límites de coordenadas del área de estudio	37
Tabla 4. Mapas utilizados para cada año de estudio.	40
Tabla 5. Valores mínimos y máximos de DN antes y después de corrección atmosférica.	42
Tabla 6. Comparación de firmas espectrales por sensor y clase.	47
Tabla 7. Abreviaturas utilizadas en matriz de error.	51
Tabla 8. Matriz de error para clasificación del año 1973.	52

Tabla 9. Exactitud del productor, del usuario y general 1973.	52
Tabla 10. Matriz de error para clasificación del año 1989.	53
Tabla 11. Exactitud del productor, del usuario y general 1989.	53
Tabla 12. Matriz de error para clasificación del año 2020.	54
Tabla 13. Exactitud del productor, del usuario y general 2020.	54
Tabla 14. Superficie por clase y polígono para cada año de análisis.	55

## Resumen

La subcuenca Chalco-Xochimilco representa un alto valor ambiental, agroalimentario, urbano y cultural dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, las áreas verdes de esta zona han tenido grandes pérdidas, daños severos, deterioro, alteraciones, afectaciones, modificación del hábitat, de los ecosistemas y requieren ser restauradas o preservadas. Este trabajo presenta un análisis en el cambio de uso de suelo en las fechas de abril de 1973, febrero de 1989 y febrero de 2020 en esta zona de estudio, empleando imágenes satelitales y utilizando un método de clasificación espectral supervisado el cual presenta exactitudes de hasta 96%, determinando que la mancha urbana ha pasado a representar del 2.53% al 46.95% de la superficie de estudio de 1973 a 2020. La necesidad de suelo urbano ha llevado a la población a instalarse incluso dentro del cráter de un antiguo volcán. Los cambios que ha sufrido el área de estudio no sólo representan una afectación al medio ambiente sino a la población en general, con problemas de hundimientos e inundaciones con la formación de un nuevo lago. Por medio del presente análisis se hacen recomendaciones para la atención a la problemática que se ha desarrollado en esta importante zona de México.

## Abstract

The Chalco-Xochimilco sub-basin represents a high environmental, agri-food, urban and cultural value within the Metropolitan Area of Mexico City. The green areas of this zone have suffered great losses, severe damage, deterioration, alterations, impacts, habitat modification, ecosystems and require restoration or preservation. This work presents an analysis of land use change in April 1973, February 1989 and February 2020 in this study area, using satellite images and a supervised spectral classification method with accuracies of up to 96%, determining that the urban sprawl has gone from representing 2.53% to 46.95% of the study area from 1973 to 2020. The need for urban land has led the population to settle even within the crater of an ancient volcano. The changes that the study area has undergone not only represent an impact on the environment but also on the general population, with problems of sinking and flooding with the formation of a new lake. Through this analysis, recommendations are made for addressing the problems that have developed in this important area of Mexico.

## Introducción

El cambio en el uso de la tierra se refiere a un cambio en el manejo de la tierra por parte de los humanos, lo que puede llevar a un cambio en la cobertura del suelo (IPCC, 2012). El cambio de uso del suelo es una de las principales causas de la pérdida de hábitat y de especies, de recursos forestales, del incremento en la erosión y no sólo eso, está relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático (Galicia *et al.*, 2007).

De acuerdo con SEMARNAT (2015), en la década de los setenta, México conservaba poco más del 75% de la superficie original de los bosques y el 69% de las selvas. Sin embargo, cuarenta años después, se conservaba casi el 73% de la superficie original de bosques (pérdida de 13 millones de hectáreas), 57% de las selvas (pérdida de 23 millones de hectáreas), 89% de los matorrales (pérdida de 5.9 millones de hectáreas) y casi del 60% de los pastizales (pérdida de 6.7 millones de hectáreas). La mayor parte de estas transformaciones ocurrieron antes de los años setenta. Solo el 68.5% de la vegetación natural, es decir, 47.9% del territorio, se conservaba como vegetación primaria hasta 2014.

El trabajo realizado por Velázquez *et al.*, (2002) titulado “*Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México*”, realizado a escala nacional y con base en cartas de uso de suelo y vegetación y el Inventario Forestal Nacional resalta la necesidad de contar con bases de datos multitemporales y a nivel regional (estatal, municipal o por región hidrológica), ya que las extrapolaciones a nivel nacional son poco confiables e imprecisas para entender las transiciones en los usos del suelo.

En este sentido, debido a su gran importancia ambiental, cultural y social para la Ciudad de México, en este texto se presenta el análisis de la subcuenca de Chalco-Xochimilco. Esta subcuenca provee servicios ambientales a la Ciudad de México y su zona conurbada con espacios naturales que llenan de vitalidad y belleza a la gran ciudad, con sus lagos y sus canales; ayuda a la regulación del clima; captura de CO<sub>2</sub>; y recarga de mantos acuíferos (Lesser-Illades *et al.*, 1990). Además, provee bienes ambientales que suministran alimentos mediante las grandes áreas de agricultura y los ingeniosos sistemas chinamperos

que permanecen como legado de las antiguas civilizaciones, para lo cual, permanecen vestigios culturales que incrementan la importancia de la gestión correcta de estos sistemas ambientales (SADER, 2018), que permiten la sostenibilidad de la ciudad y así propiciar una mejor calidad de vida de los habitantes y mantener o preservar valores, beneficios económicos, ecológicos y socioculturales en beneficio de las generaciones presentes y satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras (LGEEPA, 2023).

Sin embargo, la subcuenca de Chalco-Xochimilco enfrenta graves amenazas debido al crecimiento demográfico y urbano de la Ciudad de México, que ha provocado problemas como la contaminación del agua, la deforestación, el cambio de uso de suelo, la sobreexplotación de los recursos hídricos y la pérdida de biodiversidad (GODF, 2005). Estos problemas ponen en riesgo la sostenibilidad de la subcuenca y la calidad de vida de sus habitantes.

Por tal motivo, es necesario evaluar el estado actual y los cambios que ha sufrido la subcuenca en las últimas décadas, así como identificar las principales causas y consecuencias de estos cambios. Para ello, se emplea una metodología basada en el procesamiento digital y el análisis multitemporal de imágenes ópticas. Se espera obtener resultados que permitan cuantificar y examinar los cambios de uso de suelo y afectaciones al medio ambiente, no solo dentro de las alcaldías y municipio que conforman el área de estudio, sino de los polígonos catalogados como Áreas Naturales Protegidas (ANPs) y Suelo de Conservación (SC).

## Justificación

En 1987 el gobierno declara el área de estudio como área de conservación y establece medidas para su conservación, que incluye (DOF, 1987):

- Generar empleos permanentemente, así como el arraigamiento de los pobladores de sus áreas, fomentando el control de asentamientos.
- Mantener el equilibrio ecológico y el ahorro de recursos económicos al no crear infraestructura y otros servicios.
- Fomentar la tierra con vocación agropecuaria.
- Evitar el crecimiento del área de desarrollo urbano sobre las áreas de conservación.
- Conservar, preservar los ambientes naturales, asegurar el equilibrio ecológico y aprovechar racionalmente los ecosistemas y sus elementos.

Esta zona se caracteriza por ser la única población dentro de la Cuenca de México predominantemente dependiente y dedicada a la agricultura urbana, por lo que se considera una fuente de abasteciendo de alimentos para la Ciudad de México (SADER, 2018).

En este estudio se pretende dar a conocer datos cuantitativos y reflejar la problemática sobre el cambio desmedido en el uso de suelo de SC o ANPs a uso de suelo habitacional en las zonas emblemáticas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, debido a la importancia los servicios ecosistémicos de la subcuenca Chalco-Xochimilco, además de contribuir a futuras investigaciones y proyectos en la zona de estudio e informar a las autoridades para cumplir con los objetivos planteados desde un inicio.

Por esta razón, es necesario el monitoreo de la zona de estudio, mediante una técnica geofísica no intrusiva de clasificación supervisada de imágenes satelitales, que permite obtener información de manera constante, reduciendo la necesidad de acudir a la zona de estudio (lo cual reduce los costos), obteniendo datos confiables y con bastante exactitud.

## Objetivos

- Cuantificar el cambio en el uso de suelo del área de la subcuenca Chalco-Xochimilco por medio de una clasificación espectral de imágenes satelitales en las fechas del 20 de abril de 1973, 3 de febrero de 1989 y 25 de febrero de 2020 mediante técnicas de Percepción Remota (PR).
- Cuantificar el área total de la invasión urbana en zonas que proveen servicios ecosistémicos para el mismo periodo evaluado.

# Fundamentos teóricos

## Percepción Remota

Campbell y Wynne (2011) definen la Percepción Remota como la práctica de obtener información sobre la cobertura terrestre utilizando imágenes adquiridas desde una vista aérea, utilizando radiación electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético, reflejada desde la superficie de Tierra.

Todo en la naturaleza tiene su propia distribución única de radiación reflejada, emitida y absorbida. Estas características espectrales se pueden utilizar para distinguir una cosa de otra o para obtener información sobre la forma, el tamaño y otras propiedades físicas y químicas. Los datos de los sensores pudieran parecer ser abstractos y extraños debido al uso de regiones espectrales fuera del espectro visible, pero el resultado del uso eficaz de los datos de los sensores, análisis e interpretación para convertir los datos en información, pueden ser utilizados para resolver problemas prácticos (Aggarwal, 2004).

Los procesos y elementos involucrados en la adquisición de datos son (Lillesand *et al.*, 2015):

1. Fuente de energía
2. Propagación de energía a través de la atmósfera
3. Interacción de la energía con la superficie terrestre
4. Retransmisión de energía a través de la atmósfera
5. Sistema de detección (sensores espaciales)

## Espectro electromagnético

La energía electromagnética es generada por diversos mecanismos como cambios en los niveles energía de los electrones, aceleración de cargas eléctricas, decaimiento de sustancias radiactivas y movimiento térmico de átomos y moléculas. El sol presenta reacciones nucleares que producen el espectro completo de radiación electromagnética, la cual es transmitida a través del espacio hacia la Tierra (Campbell y Wynne, 2011).

La radiación electromagnética consiste en un campo eléctrico (E) que varía en magnitud en una dirección perpendicular a la dirección de propagación y un campo magnético (H) orientado en ángulo recto con el campo eléctrico (Campbell y Wynne, 2011) (Figura 1).

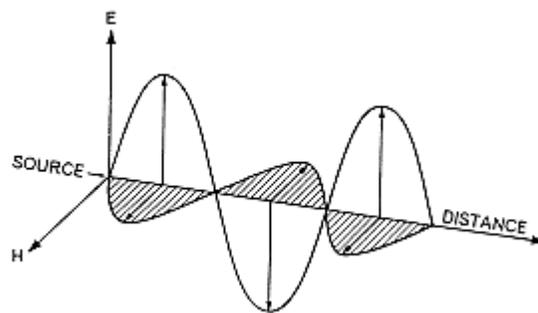


Figura 1. Componentes eléctrico (E) y magnético (H) de la radiación electromagnética. Los componentes eléctrico y magnético están orientados en ángulo recto entre sí y varían a lo largo de un eje perpendicular al eje de propagación (Campbell y Wynne, 2011).

La velocidad de la energía electromagnética es constante (c) y es igual a la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/seg) y se expresa como:

$$c = v\lambda$$

Donde  $\lambda$  es la distancia de una cresta de onda a otra consecutiva (longitud de onda) y  $v$  es el número de ciclos por unidad de tiempo (frecuencia).

Se han designado (por conveniencia) divisiones del espectro electromagnético (Figura 2) con base en la frecuencia o longitud de onda, esta última es la más utilizada en Percepción Remota y la unidad de medida

utilizada son los micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), lo cual representa  $1 \times 10^{-6}$  m (Campbell y Wynne, 2011; Lillesand *et al.*, 2015).

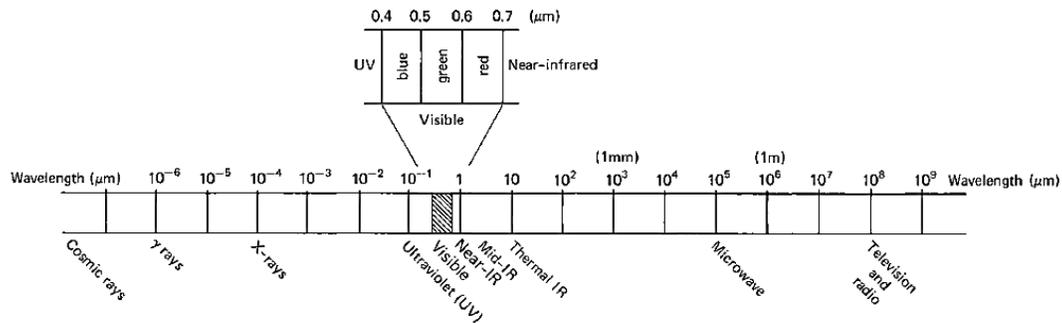


Figura 2. Espectro electromagnético (Lillesand *et al.*, 2015).

El espectro visible representa sólo una pequeña porción del espectro, es la que el ojo humano puede observar y se extiende solo desde 0.4  $\mu\text{m}$  hasta aproximadamente 0.7  $\mu\text{m}$ . El color “azul” se atribuye al rango aproximado de 0.4 a 0.5  $\mu\text{m}$ , “verde” a 0.5 a 0.6  $\mu\text{m}$  y “rojo” a 0.6 a 0.7  $\mu\text{m}$ . La energía ultravioleta (UV) se une al extremo azul de la porción visible del espectro. Más allá del extremo rojo de la región visible hay tres categorías diferentes de ondas infrarrojas (IR): IR cercano (de 0.7 a 1.3  $\mu\text{m}$ , llamado NIR), IR medio (de 1.3 a 3  $\mu\text{m}$ ; también conocido como IR de onda corta o SWIR) e IR térmico (más allá de 3 a 14  $\mu\text{m}$ , a veces denominado IR de onda larga) (Lillesand *et al.*, 2015).

### Interacción con la atmósfera

La radiación detectada por los sensores remotos tiene diversas interacciones con la atmósfera terrestre. La energía que llega a los sensores transportados por los satélites debe atravesar la atmósfera terrestre dos veces. Los efectos de la atmósfera varían dependiendo la magnitud de la señal de energía que se detecta, las condiciones atmosféricas presentes y las longitudes de onda involucradas (Lillesand *et al.*, 2015). En estas condiciones, los efectos atmosféricos pueden tener un impacto sustancial en la calidad de las imágenes y los datos que generan los sensores (Campbell y Wynne, 2011). Los procesos que ocurren son principalmente los siguientes (Lillesand *et al.*, 2015):

- **Dispersión.** Es la difusión de radiación por las partículas en la atmosfera, siendo la dispersión de Rayleigh la más común. Esta dispersión ocurre cuando interactúan moléculas atmosféricas de menor tamaño que la longitud de onda con la que interactúa. Una de las manifestaciones más claras de la dispersión de Rayleigh es en el cual se dispersan, en mayor medida, las longitudes de ondas cortas (azules entre 0.4 y 0.5  $\mu\text{m}$ ), dando así el color característico de la atmosfera terrestre. Otro tipo de dispersión es la dispersión de Mie, donde los diámetros de las partículas son iguales a las longitudes de onda de la energía con la que interactúa, siendo el vapor de agua y el polvo las causas principales de esta dispersión.
- **Absorción.** Es el resultado de la atenuación o pérdida de energía por la interacción con la atmósfera terrestre, siendo el vapor de agua, dióxido de carbono y el ozono los que absorben la mayor parte de la radiación solar.

Los rangos de longitud de onda en los que la atmosfera transmite la energía se llaman ventanas atmosféricas.

### Interacción con la superficie

Cuando la energía electromagnética incide en un objeto en la superficie de la tierra, ocurren tres fenómenos: reflexión, absorción y transmisión. En este sentido, la proporción de energía reflejada, absorbida y transmitida depende del tipo de material y condición, pero estas diferencias permiten distinguir diferentes materiales en una imagen (Campbell y Wynne, 2011):

- **Reflexión.** La reflexión ocurre cuando un rayo de luz se redirige cuando golpea una superficie no transparente. La naturaleza de la reflexión depende del tamaño de las irregularidades de la superficie (rugosidad o suavidad) en relación con la longitud de onda de la radiación considerada. Si la superficie es suave en relación con la longitud de onda, se produce una reflexión especular, la cual redirige toda, o casi toda, la radiación incidente en una sola dirección. Si una superficie es rugosa en relación con la longitud de onda, actúa como un reflector difuso o isotrópico y la energía se dispersa más o menos por igual en todas las direcciones.

- Transmisión. La transmisión ocurre cuando la radiación atraviesa una sustancia sin atenuación significativa. A partir de un espesor o profundidad dado de una sustancia, la capacidad de un medio para transmitir energía se mide como la transmitancia (t), la cual se define como la radiación transmitida entre la radiación incidente.
- Absorción. Como se mencionó anteriormente, es el resultado de la atenuación o pérdida de energía, pero para este caso, como consecuencia de la interacción con la superficie de la tierra.

Los sensores remotos operan en las regiones de onda que se refleja, de acuerdo con esto, el balance de energía queda de la siguiente manera (Lillesand *et al.*, 2015):

$$E_R(\lambda) = E_I(\lambda) - [E_A(\lambda) + E_T(\lambda)]$$

La energía reflejada ( $E_R$ ) es igual a la energía incidente ( $E_I$ ) en un objeto dado menos la energía absorbida ( $E_A$ ) o transmitida por un objeto ( $E_T$ ).

### Reflectancia

La reflectancia característica de un objeto se cuantifica como la porción de energía incidente que es reflejada. Eso es medido como una función de la longitud de onda y se llama reflectancia espectral, la cual se define como (Lillesand *et al.*, 2015):

$$\rho_{\lambda} = \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)} = \frac{\text{energía de longitud de onda } \lambda \text{ reflejada por un objeto}}{\text{energía de longitud de onda } \lambda \text{ incidente sobre un objeto}} \times 100$$

Un gráfico de la reflectancia espectral de un objeto en función de la longitud de onda se denomina firma espectral. La configuración de la firma espectral nos da una idea de las características espectrales de un objeto y tiene una gran influencia en la elección de la(s) región(es) de longitud de onda en las que se adquieren los datos para una aplicación particular.

## Plataformas y sensores

A los satélites o aviones donde se transportan los sensores necesarios para el monitoreo de la superficie terrestre se le llama plataforma. Un sensor detecta la radiación electromagnética que es registrada y procesada para la generación de imágenes. Los sensores se dividen en pasivos y activos; los primeros registran la radiación electromagnética reflejada, mientras que los segundos generan su propia fuente de radiación. Los sensores registran variaciones en la forma en que las características de la superficie terrestre reflejan y emite energía electromagnética (Campbell y Wynne, 2011).

## Landsat

Es un programa conjunto entre Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio y el Servicio Geológico del Departamento del Interior de los Estados Unidos (NASA y USGS, por sus siglas en inglés) los cuales proporcionan imágenes satelitales esenciales sobre gestión de la naturaleza de la Tierra, los recursos que aloja y nuestro medio ambiente (NASA, 2020). Se encuentra operando desde el 23 de julio de 1972 y ha tenido, hasta ahora, 8 misiones (Figura 3).

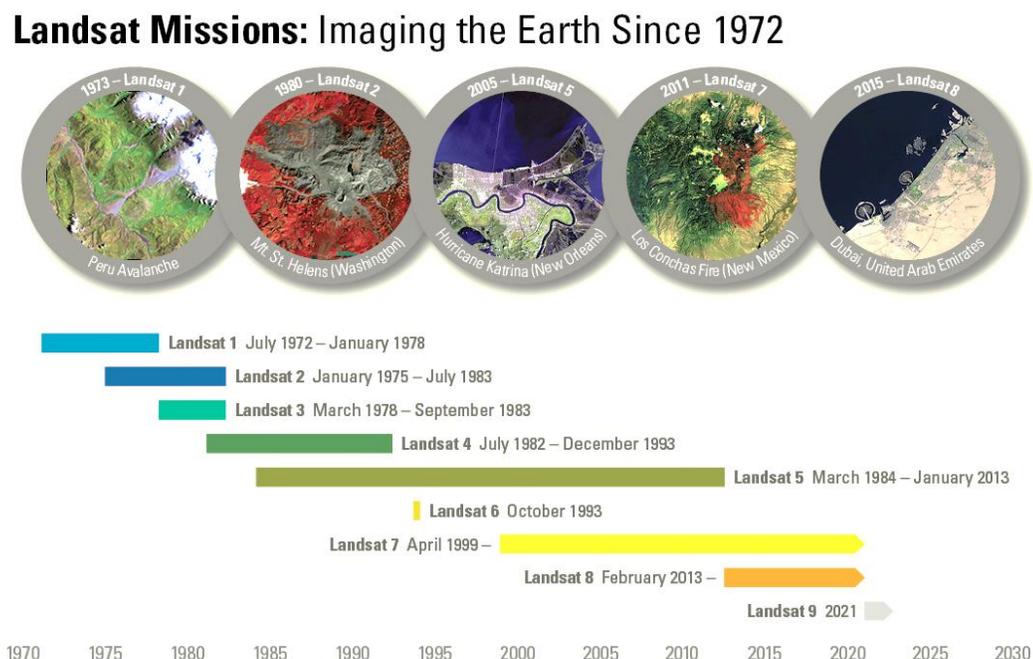


Figura 3. Línea del tiempo de las misiones Landsat desde 1972 (USGS, 2019).

## Procesamiento de imágenes satelitales

Una imagen digital es una matriz bidimensional de números y a cada celda se le llama píxel. El número que representa el brillo del píxel se llama número digital (DN, por sus siglas en inglés). Al ser una matriz de dos dimensiones, una imagen digital se compone de datos en líneas y columnas. La posición de un píxel se asigna con la línea y la columna de su DN. Estos datos ordenados se denominan datos ráster (Campbell y Wynne, 2011).

Una imagen (Figura 4) puede contener datos de una sola banda espectral o de múltiples bandas espectrales (rangos espectrales), por lo que los datos se recopilan simultáneamente en varias bandas espectrales en un rango diferente de longitudes de onda (Lillesand *et al.*, 2015).

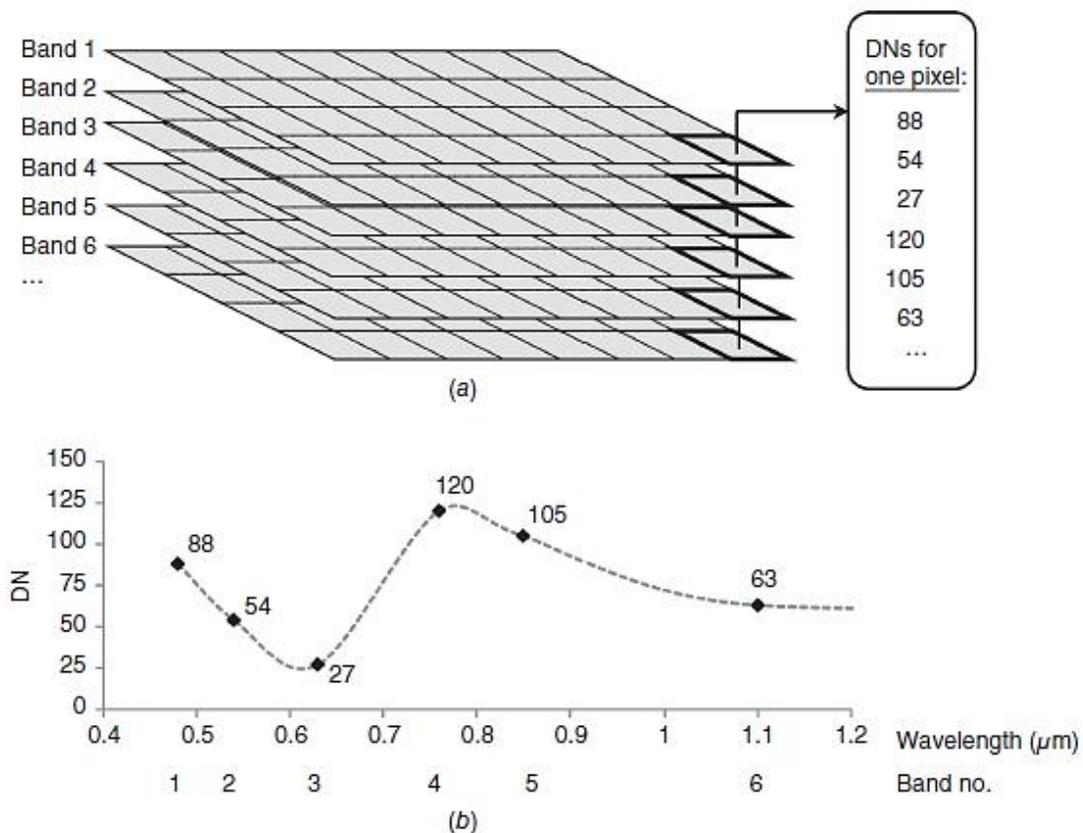


Figura 4. Propiedades básicas de los datos de imágenes digitales multispectrales. (a) Cada banda está representada por una cuadrícula de celdas o píxeles; cualquier píxel dado tiene un conjunto de DN que representan su valor en cada banda. (b) Firma espectral del píxel resaltado en (a), que muestra el número de banda y la longitud de onda en el eje X y el DN del píxel en el eje Y. Los valores entre las longitudes de onda de cada banda espectral, indicados por la línea discontinua en (b), no son medidos por este sensor y por lo tanto serían desconocidos (Lillesand *et al.*, 2015).

## Resolución de imágenes

De acuerdo con Campbell y Wynne (2011), la resolución se refiere a la capacidad de un sistema de detección remota para registrar y mostrar detalles espaciales, espectrales y radiométricos:

- La resolución espacial se refiere a la finura del detalle espacial que se puede observar en una imagen, haciendo que los objetos pequeños se puedan identificar fácilmente en una imagen. Para el caso de los sensores Landsat utilizados, la resolución se encuentra entre 30 y 80 metros.
- La resolución radiométrica se define como la capacidad de un sistema de imágenes para registrar muchos niveles de brillo. La resolución radiométrica baja representa una imagen con pocos niveles de brillo, mientras que la resolución radiométrica alta presenta mayor nivel de brillo.
- La resolución espectral denota la capacidad de un sensor para definir intervalos de longitud de onda o las regiones espectrales.
- La resolución temporal determina la periodicidad con la que son adquiridas las imágenes en una misma zona.

## Corrección atmosférica

Cualquier sensor que observe la superficie de la Tierra usando radiación, registrará una mezcla del brillo derivado de la superficie de la Tierra (brillos que son de interés para la Percepción Remota) así como del brillo de la atmósfera en sí, debido a los efectos de la dispersión atmosférica de la energía electromagnética en las partículas de agua suspendidas en la atmósfera (Campbell y Wynne, 2011). El Método de Substracción de Píxel Oscuro (DOS, por sus siglas en inglés) asume que hay un área u objeto conocido en la imagen con nula o casi nula reflectancia en todo el espectro electromagnético, por lo que, cualquier reflectancia aparente debería ser producto de la dispersión atmosférica y esta información puede ser usada para calibrar el resto de la imagen (Chavez, 1988), por lo cual se resta el valor mínimo de DN del histograma de cada una de las bandas.

## Realce espectral

Addabbo *et al.*, (2016) define el realce espectral o la composición a falso color como el despliegue simultáneo de tres regiones cualquiera del espectro electromagnético en los tres cañones del sistema RGB (rojo, verde y azul, por su nombre en inglés), para la identificación de materiales de interés. Para el caso específico en el que las bandas del espectro electromagnético se montan en los cañones RGB, dando una apariencia en colores similares a su apariencia natural, se nombra composición a color natural.

El realce espectral se realiza debido a que la mayor reflectancia de la mayoría de los materiales superficiales se encuentra en las longitudes de onda correspondientes al infrarrojo cercano (NIR) (Campbell y Wynne, 2011).

## Clasificación supervisada

La clasificación supervisada es un método semiautomático en el cual se crean polígonos de entrenamiento (independientes para cada imagen) para que el software identifique clases preliminares definidas por el usuario y ejecute una discriminación de las diferencias espectrales en cada una de las bandas. Estas clases preliminares se determinan de acuerdo con la combinación de bandas realizada, además de las cartas de uso del suelo y vegetación y foto mapas, identificando zonas urbanas, vegetación, suelo sin vegetación aparente y cuerpos de agua.

Existen diversos métodos de clasificación basados en la información de las firmas espectrales obtenidas en la clasificación supervisada para obtener la imagen clasificada:

- Paralelepípedo (PIPED) se basa en un conjunto de reflectancias de umbral superior e inferior determinadas para una firma en cada banda. Para ser asignado a una clase en particular, un píxel debe exhibir reflectancias dentro de este rango de reflectancia para cada banda considerada. El procedimiento del paralelepípedo es el más rápido de las rutinas de clasificación, pero potencialmente el menos exacto, dejando pixeles sin clasificar (Ronald Eastman, 2012).

- Máxima verosimilitud (MAXLIKE) el cual utiliza los datos de entrenamiento como un medio para estimar las medias y las varianzas de las clases, que luego se utilizan para estimar las probabilidades y la variabilidad de los valores de brillo en cada clase (Campbell y Wynne, 2011). Se calcula la probabilidad de que un píxel pertenezca a cada uno de un conjunto predefinido de clases y, a continuación, el píxel se asigna a la clase para la que la probabilidad sea la más alta (Mather y Tso, 2016).  
Es sensible a las variaciones en la calidad de los datos de entrenamiento y al número de muestras o polígono de entrenamiento realizados, incluso más que la mayoría de las otras técnicas supervisada y los datos de entrenamiento que no se seleccionan cuidadosamente pueden introducir errores (Campbell y Wynne, 2011).
- La clasificación de Mínima Distancia (MINDIST) se basa en la reflectancia media en cada banda para una firma. Los píxeles se asignan a la clase con la media más cercana al valor de ese píxel. Un píxel de identidad desconocida se etiqueta calculando la distancia entre el valor del píxel desconocido y el vector espectral medio de clase a su vez. MINDIST se aplica comúnmente cuando el número de píxeles utilizados para definir firmas es muy pequeño o cuando los sitios de entrenamiento no están bien definidos (Mather y Tso, 2016).

### Evaluación del error

Para Congalton (1991), la representación del error en forma matiz (llamada matriz de error) ayuda a visualizar de mejor manera los datos, ya que las precisiones de cada categoría se describen claramente junto con los errores presentes en la clasificación.

La exactitud general se calcula dividiendo el total de aciertos (suma de la diagonal principal) entre el número total de píxeles en la matriz de error, lo cual representa los aciertos o concordancia entre el mapa verdad (columnas) y la clasificación realizada (filas).

Para obtener la exactitud de cada clase, se divide el número total de píxeles correctos o equivocados de cada clase entre el número total de píxeles de ésta derivado de los datos de referencia (total de la columna).

Esta medida de exactitud llamada exactitud del productor, indica la probabilidad de que un píxel de referencia sea correcto, ya que el productor (quien realiza la clasificación) está interesado en qué tan bien puede ser un área determinada. Por otro lado, si el número total de píxeles correctos en una categoría se divide por el número total de píxeles que se clasificaron en tal categoría (el total de la fila o clasificación generada), entonces este resultado es una medida llamada exactitud del usuario, que indica la probabilidad de que un píxel clasificado en la imagen realmente represente esa categoría en el terreno (Story y Congalton, 1986).

Como forma de obtener una evaluación con mayor exactitud, utilizando toda la información de la matriz de error, se obtuvo el coeficiente kappa, que se describe matemáticamente como (Ariza *et al.*, 2018):

$$k = \frac{Pr(a) - Pr(e)}{1 - Pr(e)}$$

Donde Pr(a) representa la proporción total de celdas que coinciden en ambas capas

$$Pr(a) = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ii}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}}$$

Y Pr(e) la probabilidad hipotética aleatoria

$$Pr(e) = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij} \sum_{k=1}^n x_{ki}}{(\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x_{jk})^2}$$

El coeficiente kappa no presenta sesgo por una posible coincidencia casual de clases, debido a que toma en cuenta la posibilidad de que exista concordancia por azar. En resumen, el valor máximo del coeficiente kappa ( $\kappa$ ) es 1, lo que indica una concordancia perfecta entre la clasificación y los datos de referencia, mientras que, si no hay concordancia,  $\kappa$  se vuelve negativo. El valor mínimo de  $\kappa$  depende del caso, pero siempre que sea 0, indica cero concordancias entre la clasificación y los datos de referencia (Liu y Manson, 2013).

## Zona de estudio

### Cuenca Tectónica de México (CTM)

La Cuenca de México incluye, además del área de la Ciudad de México, una parte territorial o colindante de los estados de México, Hidalgo, Puebla y Morelos. Geomorfológicamente la Cuenca de México es una depresión tectónica elevada (2,400 msnm), con una superficie aproximada de 9,600 km<sup>2</sup>. Los procesos geológicos de esta cuenca han favorecido un régimen endorreico con parteaguas cardinales asociados a cadenas volcánicas de reciente formación (Ferrari, 2000). La Cuenca de México se encuentra limitada fisiográficamente:

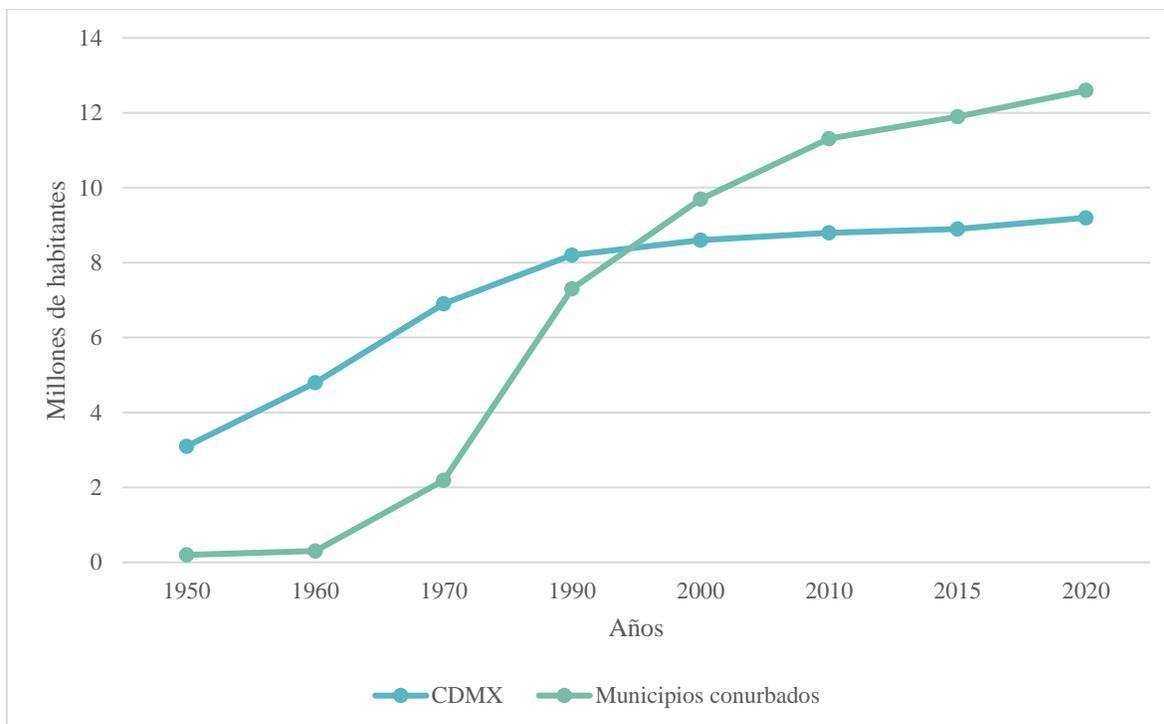
- En la parte sur por la Sierra del Chichinautzin
- Al norte por las Sierra de Guadalupe, el Cerro de Chiconautla y la Sierra Patlachique
- Al este por la Sierra Nevada (que incluye los edificios volcánicos Popocatépetl e Iztaccíhuatl)
- Al oeste por las Sierra de las Cruces

Estas características topográficas favorecieron que la cuenca estuviera conformada inicialmente y hasta hace unos 500 años atrás, por 5 grandes lagos. De estos, los lagos de Zumpango, Xaltocan y Texcoco eran de agua salada mientras que los de Chalco y Xochimilco de agua dulce. Se estima que la superficie original lacustre era de 1,500 km<sup>2</sup> (Gómez, 2010).

A partir del siglo XVII estos lagos esenciales para un entorno lacustre único en el mundo, empezaron a ser secados artificialmente y así poder albergar a la actual Ciudad de México. La zona de lagos fue progresivamente drenada y, adicionalmente, con el objetivo de evitar grandes inundaciones, se ha extraído el agua por medio de un sistema de drenaje profundo. Para 1864 sólo subsistían alrededor de 230 km<sup>2</sup> de la superficie original y para 1891 tan sólo 95 km<sup>2</sup> (Gómez, 2010). En la actualidad solo se encuentran remanentes pequeños de estos lagos en Xochimilco, Chalco, Zumpango y Texcoco.

## Ciudad de México y la Zona Metropolitana

La Ciudad de México, capital del país y anteriormente llamado Distrito Federal, cuenta con una superficie de 1,494.3 km<sup>2</sup>, lo que representa 0.1 % de la superficie del país (INEGI, 2021a). En este lugar es donde se concentran los 3 poderes de la nación, centros culturales, económicos y financieros, haciendo que sea la entidad que aporta mayor porcentaje al Producto Interno Bruto (PIB), con 17.75% (INEGI, 2019).



Gráfica 1. Población de la Ciudad de México y municipios conurbados de 1950 a 2020 (Covarrubias, 2000; (SEDATU, CONAPO e INEGI, 2018); INEGI, 2021b).

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la cual comprende las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y un municipio del estado de Hidalgo (SEDATU, CONAPO e INEGI, 2018) ha sufrido grandes cambios demográficos a lo largo del tiempo (Gráfica 1) (García, 1991):

- De 1940 a 1970 la población tuvo un incremento exponencial, incluso descontrolado, debido al auge industrial que se produjo en esos años, el cual se comienza a consolidar como la base económica de la ZMVM, concentrando el 44.5% de la producción industrial del país.
- De 1960 a 1980 con la industria ya consolidada y en constante crecimiento, se comienza a diversificar la estructura económica, asentándose empresas orientadas a producir bienes de consumo. La población de la ZMVM pasa de 4.9 a 12.9 millones de personas.
- Entre 1980 y 1990, México experimentó la más severa crisis e inestabilidad económica, reduciendo el PIB en 12% y a su vez reduciendo el número de plantas industriales instauradas en la ZM. La tasa demográfica de la ZM fue de 2.4%, mientras que la Ciudad de México fue de 1.9%.
- De 1990 al 2001 comienzan a aumentar las actividades económicas terciarias, instalándose los subsectores financieros, seguros, bienes inmuebles, comercio, restaurantes y hoteles dentro de la ciudad. La desventaja competitiva de la industria comparada con los usos más rentables como comercios y oficinas, así como la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), que entró en vigor en 1994, provocó que la industria se desplazara del centro al norte del país (Pradilla Cobos, 2005). La población de la Ciudad de México y los municipios conurbados tuvieron procesos opuestos. Los cambios de uso del suelo por un auge de inmuebles dedicados a comercio, oficinas y servicios (Mendoza Pérez, 2009) provocaron el encarecimiento de la vivienda en la ciudad capital y la creación de unidades habitacionales de interés social hacia alcaldías alejadas al centro de la ciudad como Tlalpan, Magdalena Contreras y Xochimilco, principalmente, y a los municipios cercanos a la ciudad (como Nezahualcóyotl, Ecatepec, Chimalhuacán y Valle de Chalco Solidaridad) (Pradilla Cobos *et al.*, 2000).

- Entre el 2000 y 2006 se priorizó una política enfocada en la creación de vivienda para personas de ingresos medios y bajos, por medio de grandes desarrollos inmobiliarios, modificando drásticamente el paisaje de la periferia de la ciudad, incrementando el uso habitacional en decremento del uso agrícola (García y Castañeda, 2013).
- La tendencia de una tasa de crecimiento menor de la población de la Ciudad de México comparado con los municipios conurbados se ha mantenido la actualidad. De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, por sus siglas en inglés, 2021), la ZMVM es la segunda gran metrópoli en cuanto a población y PIB se refiere, después de Sao Paulo, en Brasil.

### Subcuenca Chalco – Xochimilco

La subcuenca Chalco – Xochimilco, llamada así por los antiguos lagos, se ubica al sur oriente de la Ciudad de México. Se delimita al norte por la Sierra de Santa Catarina, al este por la Sierra Nevada y al sur por la Sierra del Chichinautzin.

El polígono de estudio cuenta con una superficie de 24,646.50 ha, delimitado por la división territorial de las alcaldías de Xochimilco y Tláhuac, en la Ciudad de México y el municipio de Valle de Chalco Solidaridad, en el Estado de México (Figura 5).

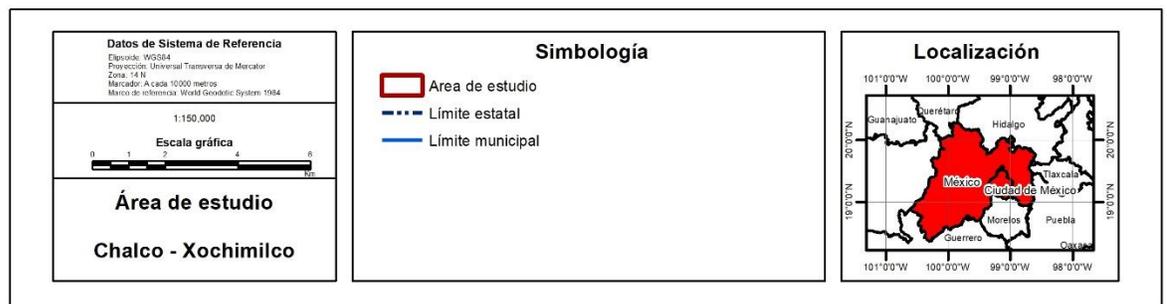
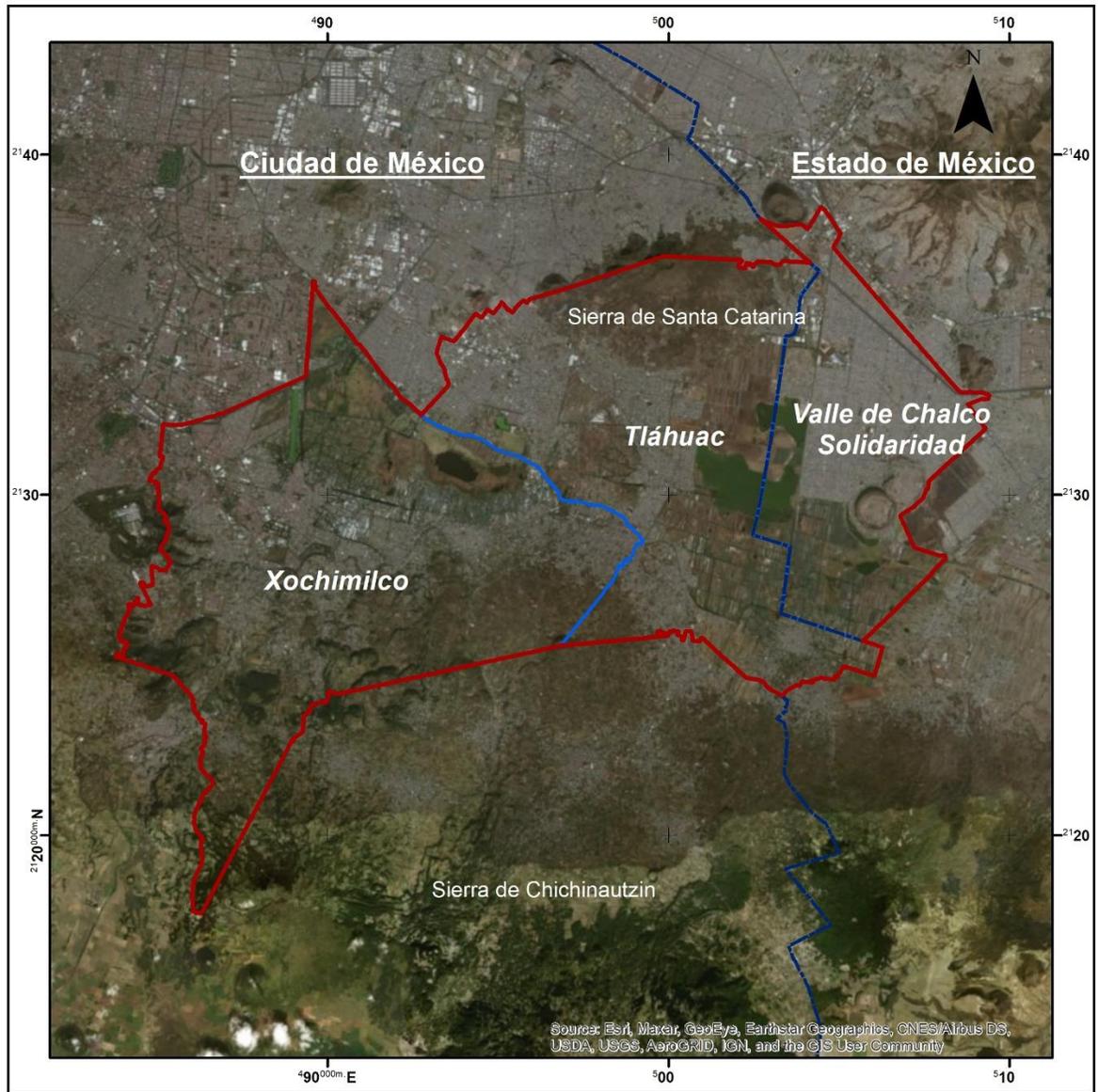


Figura 5. Mapa de ubicación de la zona de estudio en la subcuenca de Chalco-Xochimilco (INEGI, 2020; Arce, 2015)

En la Figura 6 se muestra que en la zona de estudio se combinan una serie de reconocimientos y delimitaciones de protección ambiental que han sido modificados hasta la actualidad. Las zonas de Xochimilco y Tláhuac forman parte, principalmente, del Suelo de Conservación de la Ciudad de México con categoría de “Conservación Ecológica”, a partir del año 1987 ya que, por sus características ecológicas, proveen servicios ambientales necesarios para el mantenimiento de la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México (GOCDMX, 2000).

Además, en la zona de estudio se encuentran ANPs con diferentes categorías como “Zonas Sujetas a Conservación Ecológica”, como la zona de Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco (Xochimilco) desde 1992, la “Zona de Conservación Ecológica de la Sierra de Santa Catarina” (1994) en Tláhuac y la zona del Santuario del Agua Lagunas de Xico con categoría de “Parque Estatal” en Valle de Chalco Solidaridad a partir de 2004, los cuales deben preservarse y restaurarse de acuerdo con la “Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal” (GOCDMX, 2000), en vista de que contienen muestras representativas de uno o más ecosistemas y que están destinadas a proteger los elementos naturales y procesos ecológicos que favorecen el equilibrio y bienestar social (GOCDMX, 2000).

La zona lacustre de Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco cuenta al mismo tiempo con reconocimientos internacionales como: “Patrimonio Cultural de la Humanidad” desde 1987; Sitio Ramsar, Humedales de Importancia Internacional desde 2004. Así también, la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) otorgó el reconocimiento como “Sistemas Importantes del Patrimonio Agrícola Mundial” (SIPAM) en el año 2018.

La búsqueda constante de vivienda, principalmente en las periferias de la ciudad, han provocado que esta zona de estudio sufra cambios importantes en cuanto a urbanización y apropiación del suelo, siendo practicas constantes la ocupación, autoconstrucción, autourbanización y, finalmente, la consolidación de asentamientos irregulares. El crecimiento de la Ciudad de México ha impulsado la ocupación de suelo informal en tierras ejidales y de importancia ambiental, siendo esta zona de estudio las que mayor concentración de asentamiento irregulares presentan dentro de la ciudad (Corona, 2017).

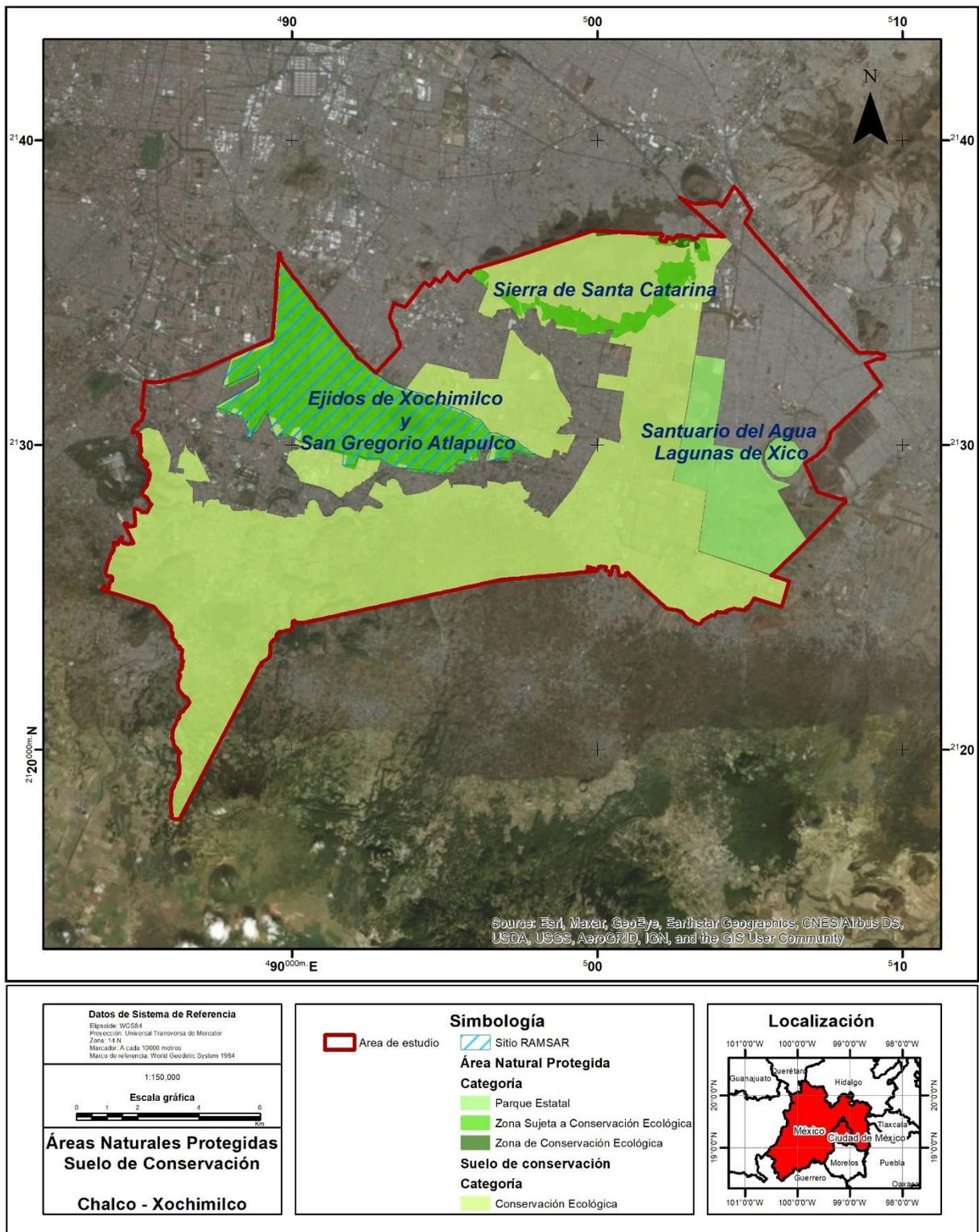


Figura 6. Mapa de polígonos de ANPs y SC de la zona de estudio (INEGI, 2020; INEGI, 2014; Bezaury-Creel *et al.*, 2009; SEDEMA, 2018).

Las áreas con algún carácter de protección representan aproximadamente el 72% del área de estudio, en este contexto geográfico, la aplicación de técnicas de PR es de gran importancia debido a la relación intrínseca de 3 características fundamentales para la regeneración y conservación de los sistemas hidrológicos y urbanos de la cuenca (Caramillo Sarabia *et al.*, 2013):

1. La distribución y extensión de la zona urbana de alta densidad
2. La existencia y codependencia de una zona agrícola urbana
3. La importancia de la zona lacustre, de ciénagas y chinampas

Estos reconocimientos internacionales resaltan la importancia de la gestión y monitoreo de la zona de estudio con nuevas tecnologías, dado que conllevan principios y normas que deben atenderse para la conservación de los estatutos, como lo es preservar las lenguas indígenas y los sistemas agroalimentarios (sistema chinampero) que a futuro ayudarán a la Ciudad de México en materia ambiental, hidrológica, económica y cultural.

### Importancia agroalimentaria

La zona de estudio tiene una serie de Servicios Ambientales que se describen a continuación (CONABIO y SEDEMA, 2016):

- Actúa como vaso regulador para el sur de la ciudad, evitando grandes inundaciones.
- El humedal de Xochimilco funciona como un sistema que regula la temperatura del ambiente a través del agua durante diferentes épocas del año, permitiendo que la temperatura sea menor en épocas de calor y evita su reducción en épocas de frío. A su vez, tanto el agua como las chinampas reducen la cantidad de luz que se refleja a la atmósfera (albedo), debido a que una región con árboles refleja menos luz que una región con suelo desnudo (el aumento en la temperatura está directamente relacionado con el incremento de la mancha urbana en la región).
- Hasta 2017, el suministro de agua hacia la ZMVM era de 68 m<sup>3</sup>/s, de los cuales 40 m<sup>3</sup>/s (59%) se extraían del acuífero local mediante pozos (de los cuales, cerca del 70% era proporcionado por la

subcuenca Chalco-Xochimilco), 25% del Río Cutzamala, 9% del Río Lerma, 10% de saneamiento y 2% de manantiales (Torres Bernardino, 2017).

- En la alcaldía de Xochimilco existen zonas con importante aptitud de infiltración, pero que al mismo tiempo presentan un mayor cambio de uso de suelo, por lo que su capacidad para prestar este se está disminuyendo.
- Los servicios de provisión son productos tangibles que proporcionan sustento básico a la vida humana, uno de ellos son los alimentos, de gran importancia para la Ciudad. Según datos de SAGARPA (2021), Xochimilco por sí sola es la segunda alcaldía con mayor valor de producción agrícola anual, después de Milpa Alta. En conjunto con Tláhuac y Valle de Chalco Solidaridad, generaron alrededor de 332 millones de pesos en 2020, produciendo: alfalfa, amaranto, avena forrajera en verde, brócoli, calabacita, chile verde, coliflor, durazno, elote, frijol, lechuga, maíz, maíz, manzana, nochebuena, nopalitos, nuez, pera, romerito, tomate verde y tulipán holandés.
- Aunque los servicios culturales son de los más difíciles de apreciar y cuantificar, sus implicaciones en la identidad cultural son relevantes. Los modos de vida agrícola, y sobre todo la chinampería, posibilitan y favorecen el mantenimiento de la identidad cultural asociada a estos modos de vida.

La chinampa (en náhuatl, *chinamitl* = cerca o valla de juncos y *apam*= terreno plano) es un sistema agrohídrico estructurado como un campo elevado y drenado (Toledo y Barrera-Bassols, 2008) que permitía una producción simultánea de diversos cultivos, sin depender de las lluvias (Espinosa y Mazari Hiriart, 2007), por esta razón se considera agricultura de riego.

La chinampa consiste en la formación artificial de extensiones de suelo sobre lagos de poca profundidad, cuyos bordes son definidos por postes de madera entretejidos utilizados para levantar cercas con zanjas de ramas y juncos entrelazados en donde se apilaba vegetación acuática, tiras de pasto, lodo del fondo del lago, una capa superficial de suelo de viejas chinampas, y se apilaban rocas basálticas sobre una cama de ramas entrelazadas como cimiento (Toledo y Barrera-Bassols, 2008).

Posteriormente, se plantaban ahuejotes (*Salix bonplandiana*) alrededor de la chinampa con el fin de retener el suelo y proteger los cultivos (Stephan-Otto, 1998), previniendo la erosión de los suelos, proporcionando sombra a otros estratos de vegetación, regular los cambios de temperatura entre el día la noche y como fuente para la provisión de leña para construir nuevas chinampas y amortiguar el efecto de los vientos (Toledo y Barrera-Bassols, 2008).

El tamaño de la chinampa era relativamente pequeño (de 100 a 500 m<sup>2</sup>), la forma estrecha y rectangular, así como la altura del suelo de la chinampa que era cuidadosamente nivelada para mantener la altura adecuada con respecto al agua (30-60 cm), tenían como fin permitir el flujo permanente de la humedad en la subsuperficie de esa micro isla mediante subirrigación o percolación de las aguas subterráneas, permitiendo el desarrollo de cultivos bajo condiciones de déficit de humedad, cuando el inicio de la temporada de lluvias se retrasaba o bien, cuando los meses de verano eran excepcionalmente secos (Toledo y Barrera-Bassols, 2008).

## Zonificación Geotécnica

En la Figura 7 se muestra el mapa de la Zonificación Geotécnica de la zona de estudio que, de acuerdo con el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, a exploraciones, estudios sobre cimentaciones, características estratigráficas y mecánicas (GOCDMX, 2018; Marsal y Mazari, 1969), se divide en:

- Zona I Firme o de Lomas, corresponde a las laderas de las cadenas montañosas circundantes (Cabral-Cano *et al.*, 2008), por su altitud relativa y condiciones favorables para cimentar estructuras, sin capas de arcilla compresibles. Existen intercalaciones de basaltos, ignimbritas y cenizas volcánicas (DODF, 2003). Debido a la explotación de minas de arena y grava, es común que se presenten cavernas, túneles y rellenos artificiales no controlados
- Zona II de Transición, la cual es un depósito de pendiente y representa la transición entre la zona firme y de lago (Cabral-Cano *et al.*, 2008). Contiene principalmente grava y arenas gruesas intercaladas con arcillas volcánicas altamente compresibles y pequeñas coladas de basalto (Aranda Sánchez, 2004). Las condiciones del subsuelo varían de un punto a otro del área urbanizada.
- Zona III de Lago, integrada por depósitos areno-arcillosos, con hasta 80 m de profundidad, arcillas volcánicas altamente compresibles con una permeabilidad relativamente baja (Cabral-Cano *et al.*, 2008), intercaladas con capas de arena entre 15 a 32 m de profundidad, suelo arcilloso compacto y rígido a 33 m, arcillas volcánicas comprimidas y depósitos de arena con grava intercalada con limos o arcilla arenosa. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser incluso superior a 50 m.

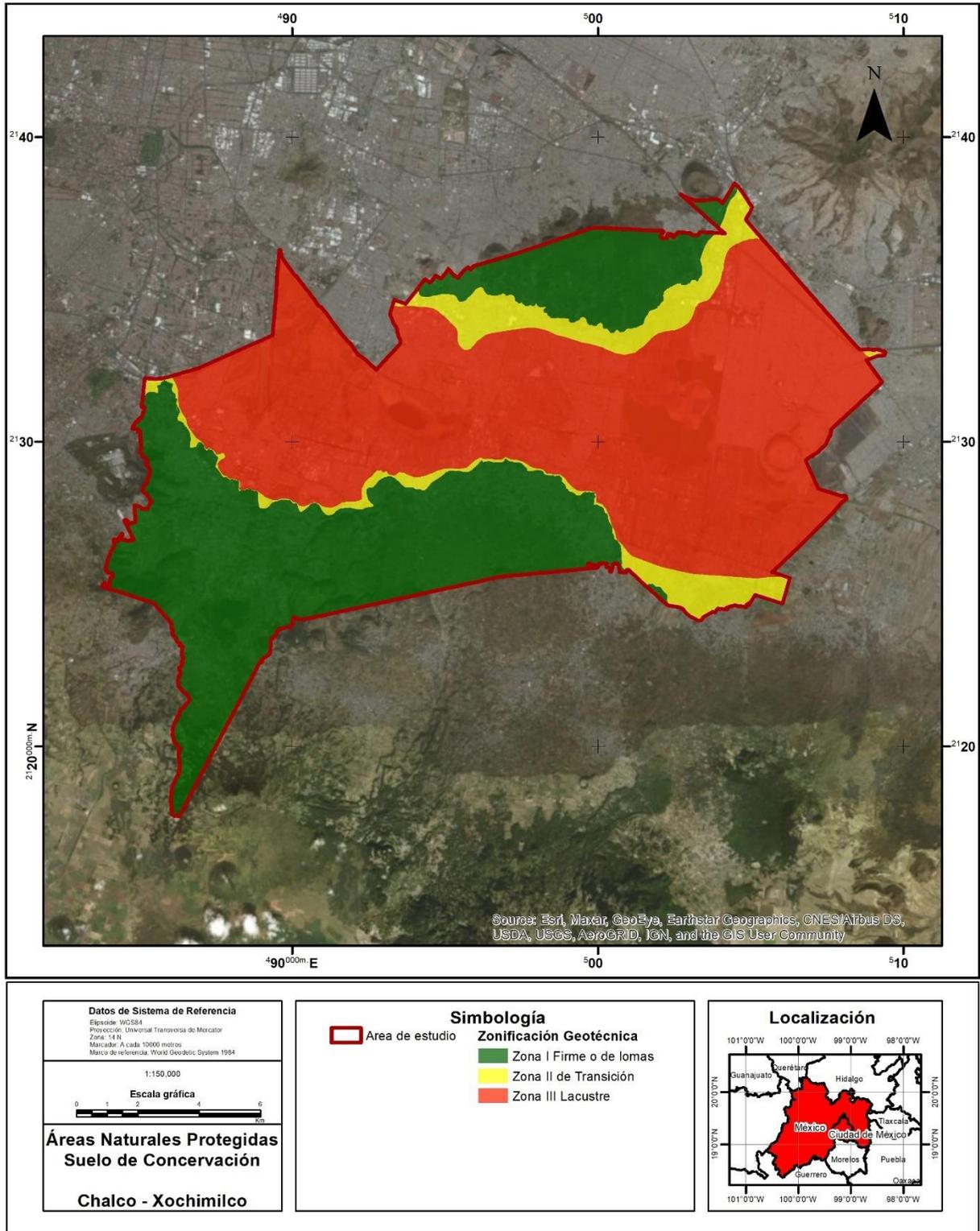


Figura 7. Mapa de Zonificación Geotécnica para la subcuenca Chalco – Xochimilco, SSW de la Cuenca Endorreica de México (CENAPRED, 2015)

La Tabla 1, muestra las áreas de cada tipo de suelo que predominan en la zona de estudio, que incluye la zona chinampera y agrícola, corresponde a terreno lacustre (Zona III) y rodeando la zona chinampera y agrícola se encuentra la zona de transición (Zona II). Finalmente, la zona firme (Zona I) en la Sierra de Chichinautzin y Sierra de Santa Catarina.

Tabla 1. Superficie en hectáreas por Zona Geotécnica en el área de estudio.

<b>Zona Geotécnica</b>	<b>Zona I Firme o de Lomas</b>	<b>Zona II de Transición</b>	<b>Zona III de Lago</b>
Hectáreas (ha)	9,472.77	1,949.67	13,221.06
Porcentaje (%)	39	8	53

Existen diferentes riesgos asociados a cada Zona Geotécnica, de acuerdo con Juárez-Camarena *et al.*, 2016:

- Zona III. Esta zona corresponde al 53% del total del área de estudio. Se presenta problemas de hundimiento principalmente por la pérdida de presión en el acuitardo poco profundo asociado con la sobreexplotación de agua, provocando fracturamientos (Cabral-Cano *et al.*, 2008; Chaussard *et al.*, 2014). De manera particular, se han identificado hundimientos diferenciales de hasta 30 cm/año en las zonas de Tláhuac, Xochimilco y Valle de Chalco, provocando acumulación de agua en la superficie (Chaussard *et al.*, 2014). Esta condición geomorfológica local genera un recurrente problema de inundaciones, así como la formación de un nuevo lago.
- Zona II. Aunque esta zona es la que representa menor superficie del área de estudio (8%), es de gran importancia debido que el asentamiento es poco uniforme debido a la configuración irregular de estas intercalaciones (lentes, cauces enterrados, abanicos aluviales, etc.). Esta zona presenta de igual manera hundimientos y fracturamientos, lo cual tiene consecuencias más graves cuando la transición entre materiales firmes de la Zona I y blandos de la Zona III se presenta en forma abrupta. Esto concuerda con un estudio realizado por Chávez y

colaboradores (2014) en San Antonio Tecomitl, Milpa Alta, cercano a la zona de estudio y en una zona de transición, donde mediante tomografía de resistividad eléctrica, se detectaron patrones de fracturas, que se extienden más allá de la zona de estudio, produciendo grandes afectaciones estructurales a construcciones, debido a la pobre consolidación suelo.

- Zona I. Esta zona se caracteriza por su heterogeneidad o posible presencia de laderas y barrancas inestables. Representa 39% del área de estudio y ocupa la parte más meridional de la subcuenca Chalco-Xochimilco.

La transformación de las condiciones naturales en las zonas de transición y firme (las de mayor permeabilidad en el SC) repercute en la disponibilidad de agua para la ZMVM. El crecimiento urbano impide la infiltración y recarga de acuíferos, ya que sustituye la cobertura natural por una capa impermeable de pavimento y edificios (GDF, 2000) acrecentando los problemas de subsidencia anteriormente mencionados.

## Metodología

Se obtuvieron imágenes a través del portal USGS Earth Explorer, de las plataformas y sensores Landsat 1 MSS (*Multi Spectral Scanner*), Landsat 4 TM (*Thematic Mapper*) y Landsat 8 OLI (*Operational Land Imager*), correspondientes a las fechas: 20 de abril de 1973, 3 de febrero de 1989 y 25 de febrero de 2020, respectivamente (Tabla 2). La imagen correspondiente a 1973 es la imagen con mayor antigüedad que puede obtenerse de la plataforma Landsat, la imagen de 2020 busca obtener la información actual de la zona de estudio, teniendo una fecha intermedia para analizar las condiciones de la zona de estudio y previo a los decretos de ANPs y SC de la zona de estudio.

Tabla 2. Características plataformas y sensores utilizados en el estudio de la subcuenca Chalco-Xochimilco. Se muestran para cada uno las bandas espectrales y su resolución.

Plataforma	Sensor	Banda	Nombre de la banda	Resolución espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)	Resolución radiométrica (bits)
Landsat 1	MSS	4	Verde (G)	0.5 – 0.6	60 (Remuestreado)	8
		5	Rojo (R)	0.6 – 0.7		
		6	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.7 – 0.8		
		7	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.8 – 1.1		
Landsat 4	TM	1	Azul (B)	0.45 – 0.52	30	8
		2	Verde (G)	0.51 – 0.60		
		3	Roja (R)	0.63 - 0.69		
		4	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.76 - 0.90		
		5	Infrarrojo Cercano (NIR)	1.55 - 1.75		
		7	Infrarrojo Medio	2.08 - 2.35		
Landsat 8	OLI	2	Azul (B)	0.45 – 0.51	30	16
		3	Verde (G)	0.53 – 0.59		
		4	Roja (R)	0.63 – 0.67		
		5	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85 – 0.88		
		6	Infrarrojo de Onda Corta 1 (SWIR 1)	1.57 – 1.65		
		7	Infrarrojo de Onda Corta 2 (SWIR 2)	2.11 – 2.29		

En todos los casos se seleccionaron buscando la menor interferencia climatológica como lluvia o nubes que alteraran la calidad de las imágenes deseada para cumplir con el objetivo de este trabajo.

Las imágenes fueron recortadas a los límites de las alcaldías de Xochimilco y Tláhuac, así como el municipio de Valle de Chalco Solidaridad, con base en el Marco Geoestadístico de 2020 (INEGI, 2020), con límites mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Límites de coordenadas del área de estudio. El sistema de coordenadas se encuentra en UTM-14N.

<b>Coordenada</b>	<b>Metros</b>
x Mínimo	482745
x Máximo	509955
y Mínimo	2117385
y Máximo	2137885

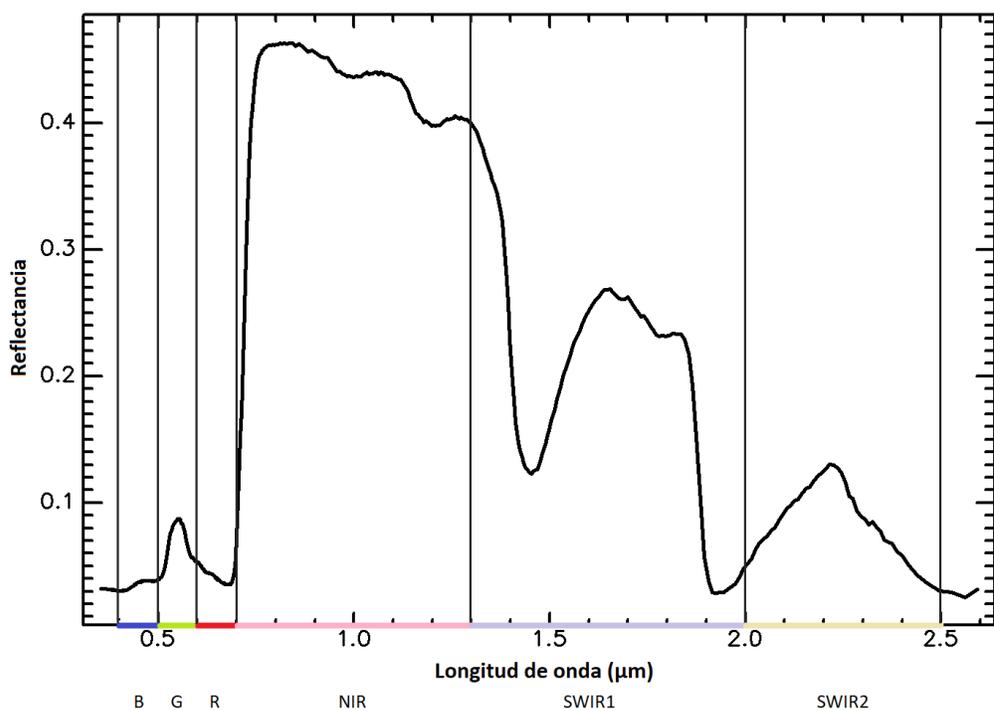
Para el procesamiento de las imágenes se utilizó el software IDRISI, de la Universidad de Clark y ArcMap para la creación de mapas y presentación de resultados.

A través de IDRISI, se realizó una corrección atmosférica en cada una de las bandas mediante el método DOS. Este procedimiento tiene ventajas como su simplicidad y la aplicabilidad casi universal, pues explota la información presente en la imagen misma (Campbell y Wynne, 2011).

Una vez realizada la corrección atmosférica, se generaron las composiciones a falso color adecuadas al presente estudio teniendo como principal consideración la región del infrarrojo cercano NIR. Como un ejemplo de la importancia de esta región, en la Gráfica 2 se observa el comportamiento de la firma espectral de las hojas vivas, donde las moléculas de clorofila (las cuales le dan color a la hoja), absorben preferentemente la luz azul (B) y roja (R), pudiendo absorber hasta de un 70% a 90% de la luz incidente en estas regiones. Las hojas reflejan más luz verde, por esta razón se ve el reflejo dominante de la luz verde en el espectro visible como el color de la vegetación viva. En el espectro del infrarrojo cercano (NIR), la reflexión de la hoja no está controlada por los pigmentos vegetales sino por la estructura interna de la hoja, la cual es casi completamente transparentes a la radiación

infrarroja, por lo que se refleja muy poca radiación infrarroja desde la parte exterior de la hoja. La radiación que pasa a través de la hoja se dispersa fuertemente por los tejidos y las cavidades dentro de ésta. Muy poca de esta energía infrarroja se absorbe internamente; la mayoría (hasta el 60%) se refleja o se transmite, teniendo así una reflectancia infrarroja brillante de la vegetación viva (Campbell y Wynne, 2011).

Lo anterior justifica la gran utilidad del espectro del infrarrojo cercano para los estudios de uso del suelo y facilita la separación de las superficies vegetadas de las no vegetales (Campbell y Wynne, 2011).



Gráfica 2. Firma espectral de vegetación tomada en laboratorio. Ejemplifica que la mayor carga de información espectral (reflectancia) no se encuentra en el espectro visible (V), sino en la región del infrarrojo cercano (NIR) y de onda corta (SWIR). Modificado de Kokaly *et al.*, 2017.

Por tal motivo, la banda del infrarrojo cercano (NIR) se desplegó en color rojo, la banda del rojo en verde y la banda verde en azul, correspondientes a las bandas 6, 5 y 4 de Landsat 1; 4, 3 y 2 de Landsat

4; y 5, 4 y 3 de Landsat 8 (escrito comúnmente como RGB654, RGB432 y RGB543), ya que es un estándar en falso color (Addabbo *et al.*, 2016).

Con la aplicación del realce espectral, se pudieron crear polígonos de entrenamiento para identificar los materiales contenidos en la imagen. Una vez delimitados los polígonos de entrenamiento, se comparan las firmas espectrales de las clases, evitando que el rango de valores de reflectancia de cada clase se intersecte. En caso de que esto ocurra, se procede a crear nuevos polígonos de entrenamiento. Este proceso se realiza para evitar la confusión del software en el proceso de obtención de la imagen clasificada y aumentar la precisión del resultado.

Para la evaluación del error, como mapa verdad, se utilizaron cartas de uso del suelo y vegetación, así como foto mapas proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (Tabla 4).

La elaboración de cartas de uso del suelo y vegetación por parte de INEGI tiene lugar desde 1968 y han elaborado seis Series: Serie I (año base 1985), Serie II (año base 2002), Serie III (año base 2002), Serie IV (año base 2004), Serie V (año base 2011) y Serie VI (año base 2014) (INEGI, 2017). La utilización de publicaciones de diferentes años se debe a la disponibilidad de mapas en el portal de INEGI, así como el intervalo de tiempo de las series y publicación. En todos los casos se seleccionaron los mapas más cercanos a las fechas de estudio.

Tabla 4. Mapas utilizados para cada año de estudio.

<b>Año</b>	<b>Tema</b>	<b>Clave</b>	<b>Entidad Federativa</b>	<b>Publicación</b>	<b>Escala</b>
1973	Carta del Uso del Suelo y vegetación	E14A49	Milpa Alta	1976	1:50,000
		E14A39	Ciudad de México	1977	
		E14B31	Chalco	1982	
		E14B41	Amecameca	1983	
	Foto Mapa	E14A39-C	Aeropuerto Internacional	1982	1:20,000
		E14A39-E	Ciudad Universitaria	1982	
		E14A39-F	Iztapalapa	1982	
		E14B31-D	Chalco	1983	
		E14B41-A	San Pablo Atlazalpa	1983	
		E14A49-C	Milpa Alta	1983	
1989	Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación	E14-2	Ciudad de México	1984	1:250,000
	Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación Serie II	E14-2	Ciudad de México	1997	
	Foto Mapa	E14A39-C	Aeropuerto Internacional	1982	1:20,000
		E14A39-E	Ciudad Universitaria	1982	
		E14A39-F	Iztapalapa	1982	
		E14B31-D	Chalco	1983	
		E14B41-A	San Pablo Atlazalpa	1983	
		E14A49-C	Milpa Alta	1983	
2020	Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación Serie V	E14-2	Ciudad de México	2013	1:250,000
	Conjunto de datos vectoriales de Uso del suelo y vegetación Serie VI	Capa Unión	Estados Unidos Mexicanos	2016	

Se generaron un mínimo de 50 puntos de muestro por cada clase identificada (Congalton, 1991), para generar las matrices de error de las clasificaciones.

## Resultados

Una vez realizado el procesamiento de las imágenes, para el método de DOS se obtuvo lo siguiente. Se muestra en la Figura 8 el histograma correspondiente a la banda 4 de la plataforma Landsat 1 antes y después de la corrección atmosférica, en el cual el mínimo valor de DN desplegado pasó de 36 a 0. Este proceso se realizó para cada una de las bandas utilizadas para cada año de estudio (Tabla 5).

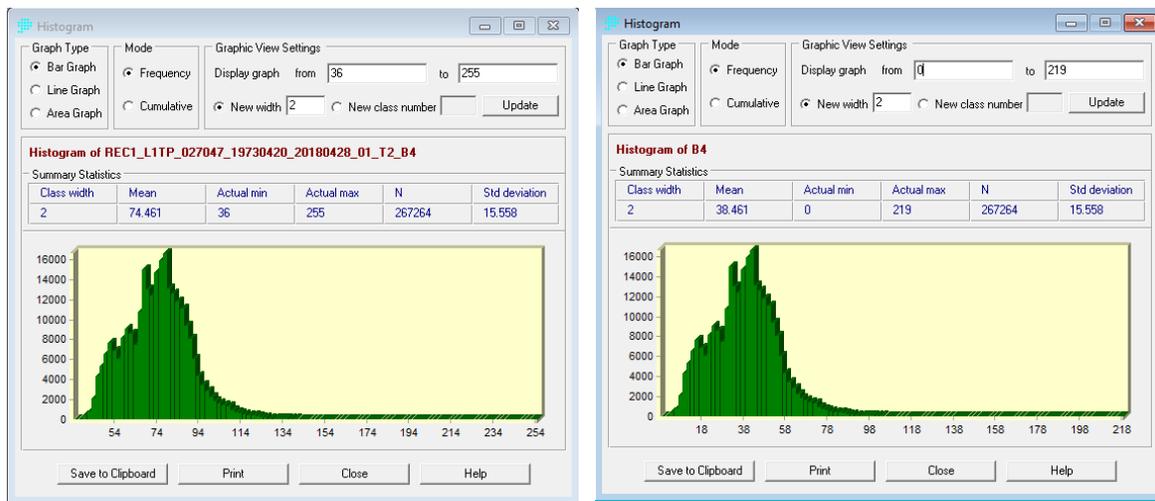
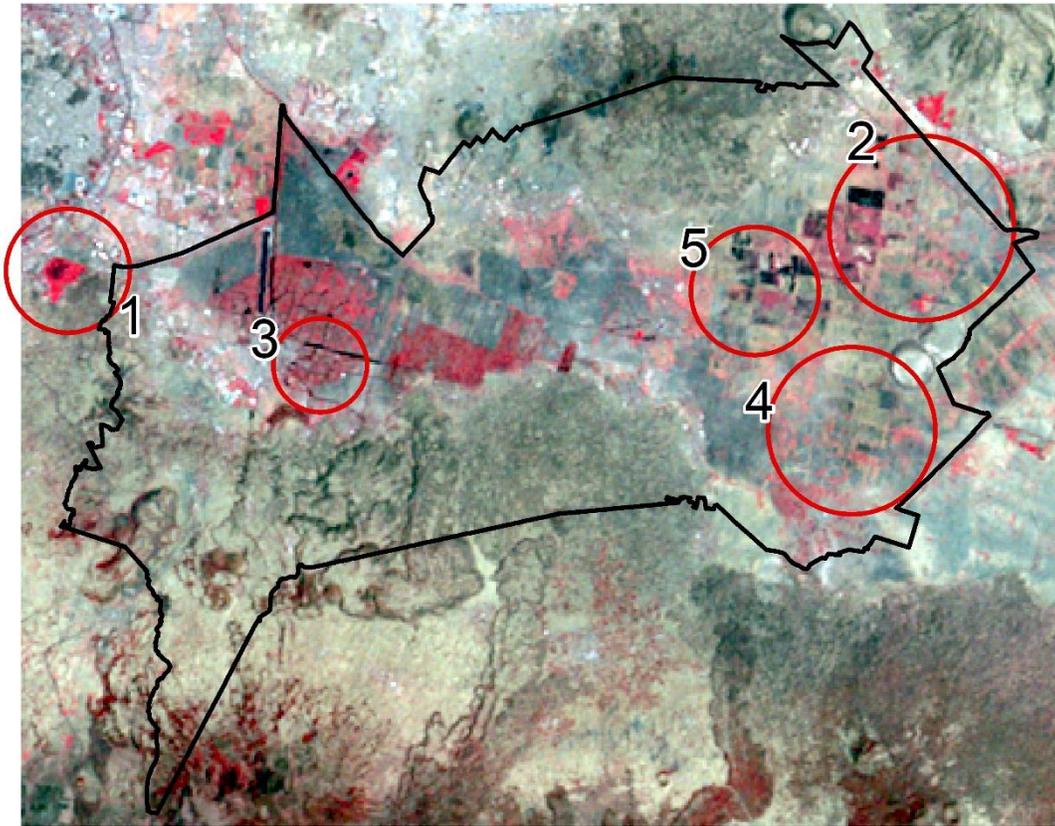


Figura 8. Histograma antes y después de la corrección atmosférica de banda 4 de Landsat 1 MSS.

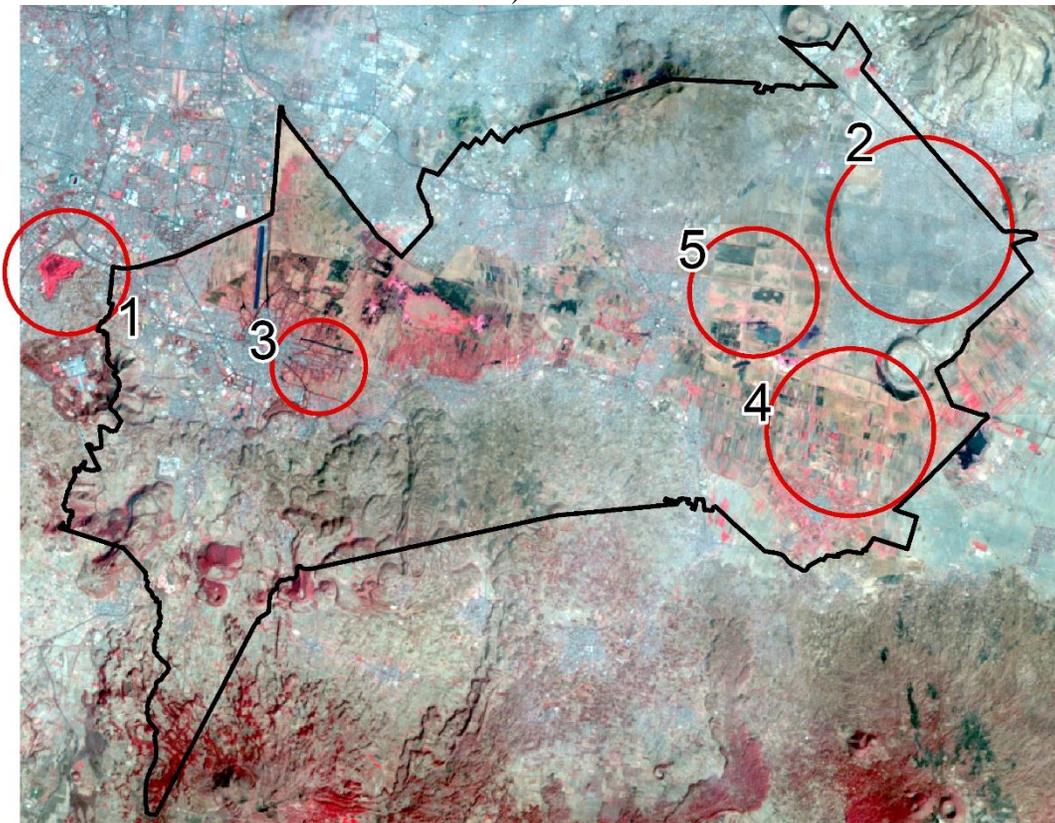
Tabla 5. Valores mínimos y máximos de DN antes y después de corrección atmosférica.

Plataforma	Banda	Min. antes	Min. después	Máx. antes	Máx. después
Landsat 1	4	36	0	255	219
	5	20	0	255	219
	6	18	0	255	237
	7	12	0	211	199
Landsat 5	1	44	0	255	211
	2	15	0	183	168
	3	12	0	205	193
	4	9	0	138	129
	5	8	0	255	247
	7	3	0	255	252
Landsat 8	2	6997	0	24782	17785
	3	6101	0	29065	22964
	4	5635	0	32060	26425
	5	5085	0	32060	37121
	6	4848	0	57368	52520
	7	5085	0	60015	55110

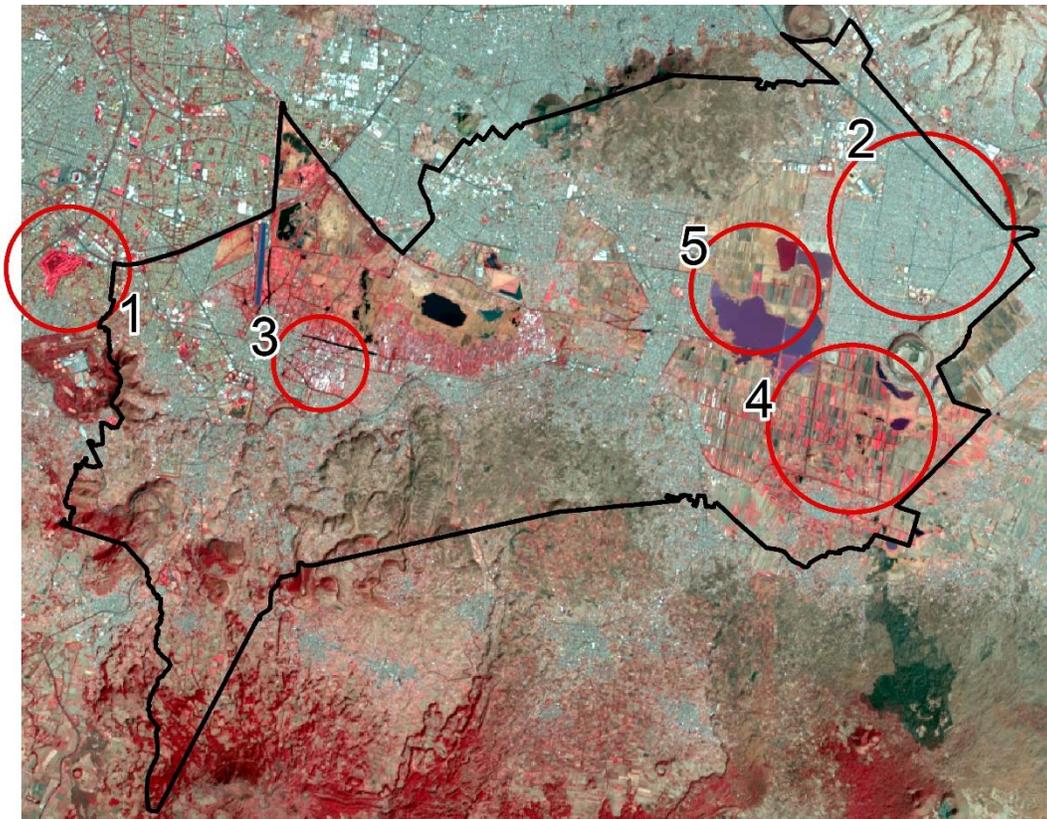
En la Figura 9 se observa que, en el área de estudio, para el año de 1973 sobresalen los tonos verdes oscuro al centro, junto con tonos rojos y negros; los tonos color café se encuentran al centro de la zona de estudio, así como en los límites. Para 1989 se observa una disminución de tonos verdes y negros al centro, pero con un aumento de tonos café claro y oscuro, además de píxeles rojos y cian en la zona centro, este y oeste. Para 2020, se muestra un aumento de tonos cian en el centro de la zona de estudio, en la zona oeste y en mayor proporción en la zona este; presencia de tonos azules al este y oeste, con disminución de tonos café y rojos al centro.



a) 1973



b) 1989



c) 2020

Figura 9. Composiciones a falso color: a) RGB654, b) RGB432 y c) RGB543. Es posible identificar, sobre todo en la imagen de 2020, los siguientes elementos que ayudaron a realizar la clasificación de las imágenes: 1. Club de Golf México, 2. Zona urbana de Valle de Chalco Solidaridad, 3. Invernaderos, 4. Zonas agrícolas y 5. Lago de Tláhuac-Xico.

Addabbo *et al.*, (2016) así como Campbell y Wynne (2011) identificaron que las zonas urbanas son vistas en tonos cian, donde los pixeles más brillantes son viviendas comunes en zonas altamente pobladas, carreteras e instalaciones de transporte, energía y comunicaciones; tonos azules para pueblos o las áreas residenciales que tienen suficiente cobertura de árboles. Esto concuerda con lo observado al realizar las composiciones RGB del estudio donde, mediante fotointerpretación de foto mapas y cartas de uso de suelo y vegetación de INEGI, se identificaron zonas urbanas densamente pobladas con poca o nula presencia de árboles (ejemplo: Valle de Chalco Solidaridad en Figura 9). En caso contrario, las localidades rurales más alejadas de las concentraciones urbanas, las cuales se rodean de campos agrícolas y vegetación, presentan pixeles color azul. Las zonas altamente reflectantes muestran pixeles en tonos blancos, relacionados a centros comerciales, complejos

industriales, almacenes o fábricas con techo plano de concreto, los cuales fueron sencillos de identificar y corroborar, a causa de la respuesta espectral altamente reflejante y a que se conoce el área de estudio (Addabbo *et al.*, 2016; Campbell y Wynne, 2011). En esta misma clase se identificaron invernaderos (Figura 9), los cuales se encuentran dentro de campos agrícolas.

La vegetación se diferenció entre tonos de rojo. De acuerdo con Campbell y Wynne (2011) las diferencias en las reflectividades son más pronunciadas en el infrarrojo cercano, lo que significa que es posible asociar los tonos de rojo a diferentes tipos de vegetación. Derivado de esto, fue posible distinguir y constatar en la composición que los tonos de rojo más intensos se asocian a césped. Como caso particular, se identificó el césped del Club de Golf México (Figura 9). Los tonos rojos-rosados se asociaron a cultivos (resultado de foto interpretación, ya que los campos agrícolas suelen tener formas rectangulares bien definidas), mientras que los tonos rojos oscuros se asociaron a vegetación en zonas altas (montañas).

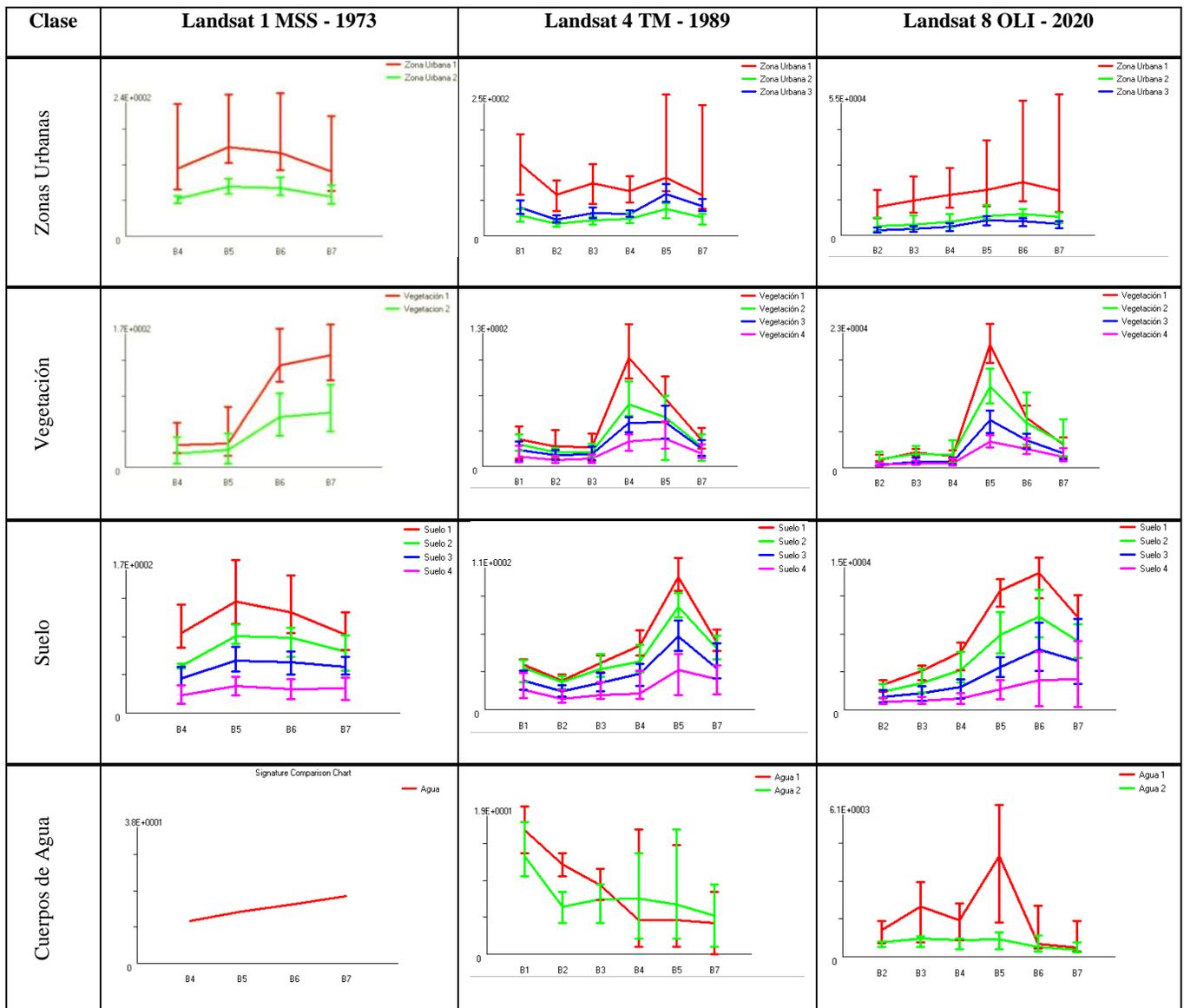
Lo cuerpos de agua se clasificaron diferenciando entre tonalidades de negro y azul, siendo los tonos negros los que corresponden a cuerpos de agua clara, a causa de que la mayor parte de la luz solar que entra en un cuerpo de agua clara se absorbe en las longitudes de onda del infrarrojo (Lillesand *et al.*, 2015). Por el contrario, en la porción visible del espectro varía drásticamente con las características del cuerpo de agua, a medida que cambia la turbidez del agua por la presencia de sedimentos suspendidos (Campbell y Wynne, 2011). Se puede observar de manera clara en la composición de la imagen de 2020, ya que la zona de estudio presenta canales y cuerpos de agua con tonos negro en el área de Xochimilco, además de cuerpos de agua en tonos azules en Tláhuac y Valle de Chalco Solidaridad (Figura 9).

El suelo desnudo húmedo tiende a ser oscuro, dada la composición realizada, es visto en tonos café oscuro y verde, al igual que los campos agrícolas arados (García Rodríguez *et al.*, 2012), coincidiendo con las zonas agrícolas al centro de la zona de estudio y en las zonas de transición de las Sierras del Chichinautzin y de la Sierra de Santa Catarina. Los suelos secos suelen ser brillosos en el infrarrojo

cercano y rojo y son vistos en tonos café claro (Campbell y Wynne, 2011) correspondiente a las zonas agrícolas de la zona de estudio (Figura 9).

Conforme a las descripciones anteriores, se generaron los polígonos de entrenamiento, obteniendo las firmas espectrales para cada clase identificada (Tabla 6). Para lograr una separación de firmas espectrales, se tuvieron que crear polígonos de entrenamiento de pequeña proporción. El clasificador más adecuado fue MINDIST, el cual es un método matemáticamente simple y computacionalmente eficiente, que se adecuó a las características de la clasificación realizada.

Tabla 6. Comparación de firmas espectrales por sensor y clase.



Los resultados de clasificación supervisada obtenidos para el área de Chalco – Xochimilco se muestran en la Figura 10, Figura 11 y Figura 12.

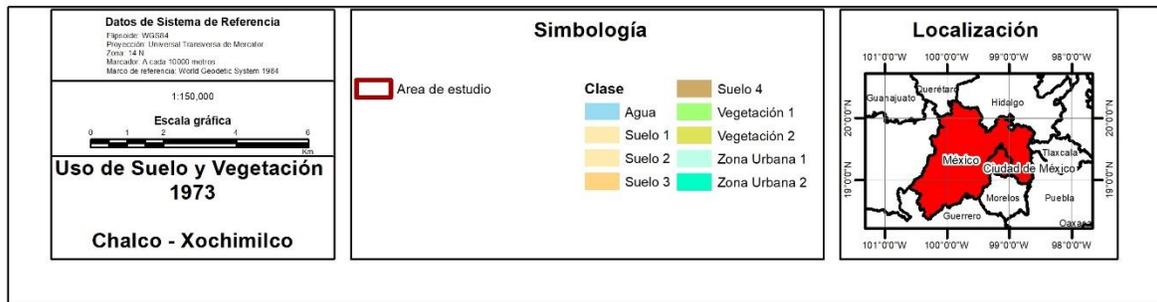
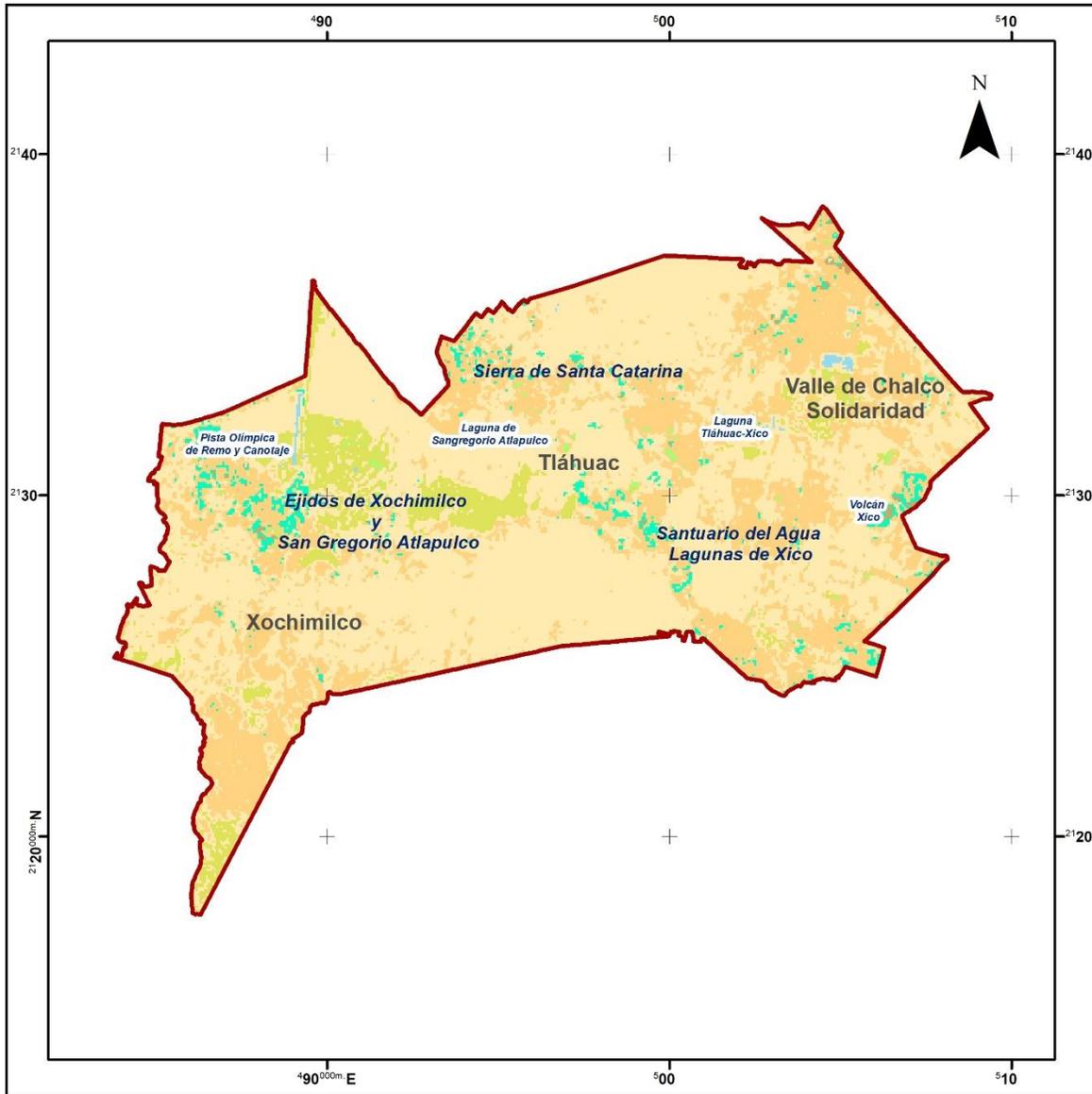


Figura 10. Resultado de clasificación supervisada para el año de 1973.

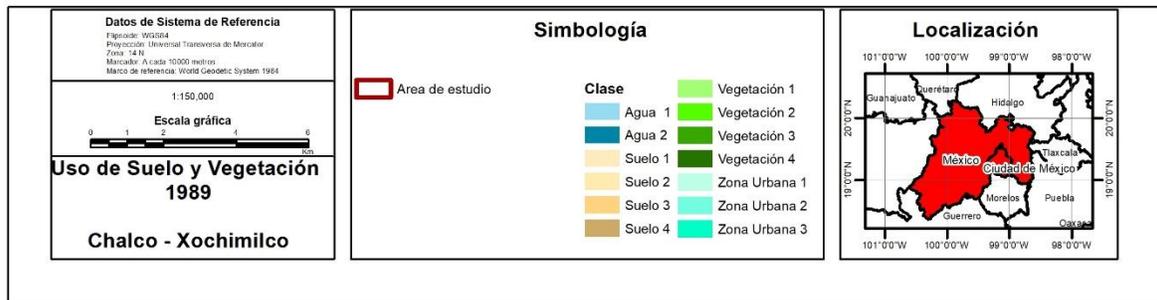
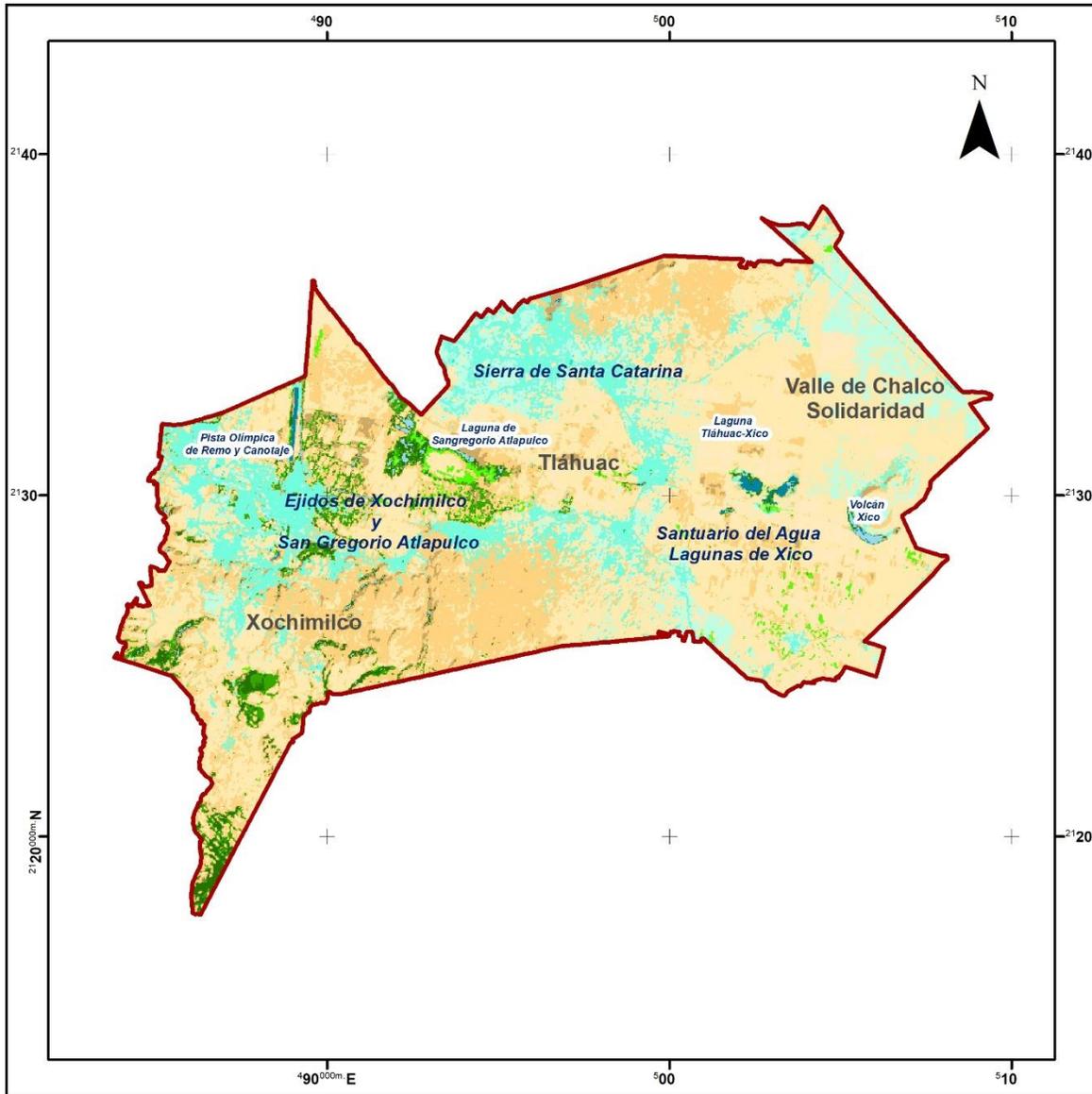


Figura 11. Resultado de clasificación supervisada para el año de 1989.

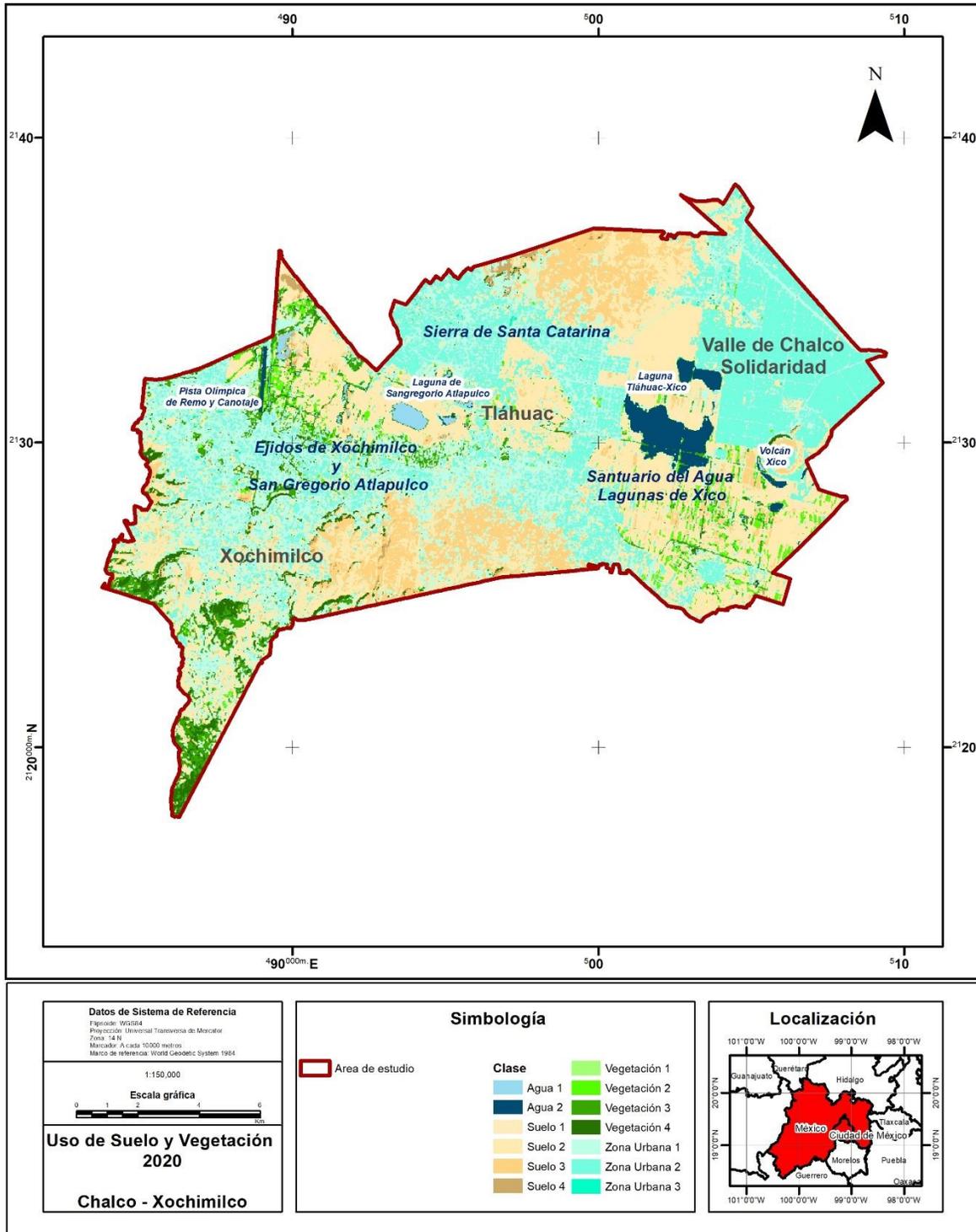


Figura 12. Resultado de clasificación supervisada para el año de 2020.

Una vez aplicado el clasificador, se realizó la evaluación del error. Para este estudio se tuvieron un total de 560 (para 1973) y 650 (para 1989 y 2020) puntos de muestro, los cuales fueron generados de manera aleatoria estratificada. Las columnas representan la categoría del mapa verdad o datos de referencia (cartas del uso del suelo y vegetación de INEGI y foto mapas), mientras que las filas indican la clasificación generada en este trabajo a partir del análisis de PR y en los mapas de uso de suelo correspondiente a 1973, 1989 y 2020, donde (Tabla 7):

Tabla 7. Abreviaturas utilizadas en matriz de error.

<b>Abreviación</b>	<b>Significado</b>
Ag	Agua
S	Suelo
Zu	Zona urbana
V	Vegetación
T	Total
Dp	Diagonal principal
K	Coefficiente kappa

Tabla 8. Matriz de error para clasificación del año 1973.

Clase	Ag	S1	S2	S3	Zu1	Zu2	V1	V2	T
Ag	11		1						12
S1		228	5	9		7		3	252
S2		2	25			1			28
S3	2	2	1	161		22			188
Zu1					2				2
Zu2		4		11		24			39
V1							4		4
V2		2		2				31	35
T	13	238	32	183	2	54	4	34	560

Suma de diagonal principal = 486

Tabla 9. Exactitud del productor, del usuario y general 1973.

Exactitud del productor		
Clase	Dp/T columna	Porcentaje
Ag	11/13	85%
S1	22/238	96%
S2	25/32	78%
S3	161/183	88%
Zu1	2/2	100%
Zu2	24/54	44%
V1	4/4	100%
V2	31/34	91%

Exactitud del usuario		
Clase	Dp/T fila	Porcentaje
Ag	11/12	92%
S1	228/252	90%
S2	25/28	89%
S3	161/188	86%
Zu1	2/2	100%
Zu2	24/39	62%
V1	4/4	100%
V2	31/35	89%

Exactitud general	
Suma Dp/T	Porcentaje
486/560	87%

K=0.81

Tabla 10. Matriz de error para clasificación del año 1989.

Clase	Ag1	Ag2	S1	S2	S3	S4	V1	V2	V3	V4	Zu1	Zu2	Zu3	T
Ag1	4													4
Ag2		4												4
S1			47											47
S2				202										202
S3					127									127
S4						14						1		15
V1							2							2
V2								9						9
V3									28					28
V4										16				16
Zu1				11	1						54			66
Zu2			1	11								113		125
Zu3													5	5
T	4	4	48	224	128	14	2	9	28	16	54	114	5	650

Suma de diagonal principal = 625

Tabla 11. Exactitud del productor, del usuario y general 1989.

Exactitud del productor			Exactitud del usuario			Exactitud general	
Clase	Dp/T columna	Porcentaje	Clase	Dp/T fila	Porcentaje	Suma Dp/T	Porcentaje
Ag1	4/4	100%	Ag1	4/4	100%	625/650	96%
Ag2	4/4	100%	Ag2	4/4	100%		
S1	47/48	98%	S1	47/47	100%	K=0.9	
S2	202/224	90%	S2	202/202	100%		
S3	127/128	99%	S3	127/127	100%		
S4	14/14	100%	S4	14/15	93%		
V1	2/2	100%	V1	2/2	100%		
V2	9/9	100%	V2	9/9	100%		
V3	28/28	100%	V3	28/28	100%		
V4	16/16	100%	V4	16/16	100%		
Zu1	54/54	100%	Zu1	54/66	82%		
Zu2	113/114	99%	Zu2	113/125	90%		
Zu3	5/5	100%	Zu3	5/5	100%		

Tabla 12. Matriz de error para clasificación del año 2020.

Clase	Ag1	Ag2	S1	S2	S3	S4	V1	V2	V3	V4	Zu1	Zu2	Zu3	T
Ag1	2													2
Ag2		6												6
S1			17											17
S2				121										121
S3					79							1		80
S4						8								8
V1							1							1
V2								13						13
V3									33					33
V4										19				19
Zu1			1	2							136			139
Zu2				14	9				1	1		183		208
Zu3													3	3
T	2	6	18	137	88	8	1	13	34	20	136	184	3	650

Suma de diagonal principal = 621

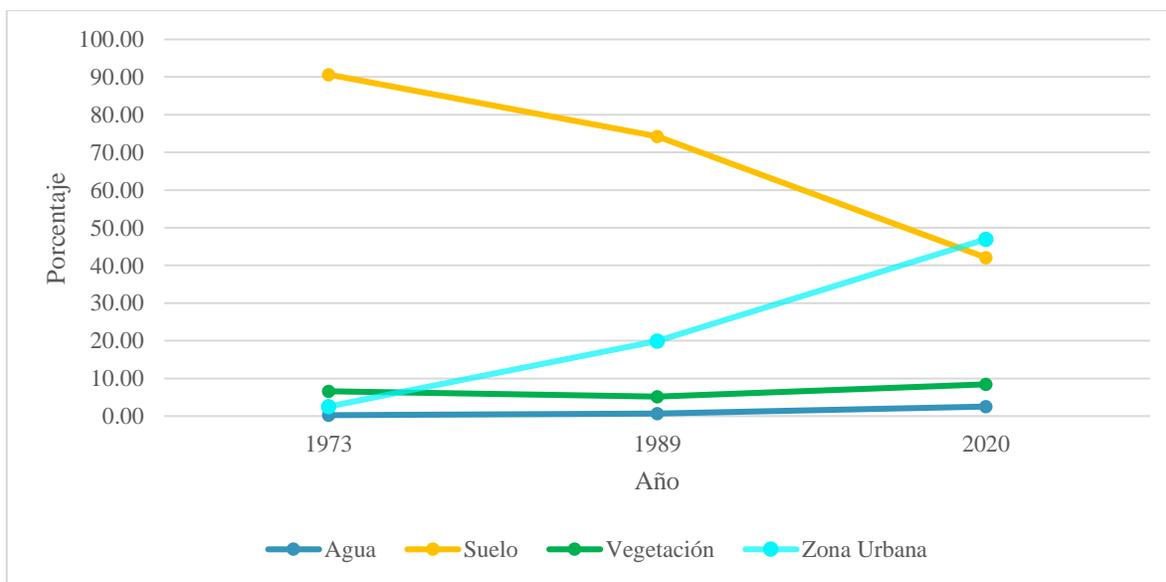
Tabla 13. Exactitud del productor, del usuario y general 2020.

Exactitud del productor			Exactitud del usuario			Exactitud general	
Clase	Dp/T columna	Porcentaje	Clase	Dp/T fila	Porcentaje	Suma Dp/T	Porcentaje
Ag1	2/2	100%	Ag1	2/2	100%	625/650	96%
Ag2	6/6	100%	Ag2	6/6	100%		
S1	17/18	94%	S1	17/17	100%		
S2	121/137	88%	S2	121/121	100%		
S3	79/88	90%	S3	76/80	99%		
S4	8/8	100%	S4	8/8	100%		
V1	1/1	100%	V1	1/1	100%		
V2	13/13	100%	V2	13/13	100%		
V3	33/34	97%	V3	33/33	100%		
V4	19/20	95%	V4	19/19	100%		
Zu1	136/136	100%	Zu1	136/139	98%		
Zu2	184/184	99%	Zu2	283/208	88%		
Zu3	3/3	100%	Zu3	3/3	100%		

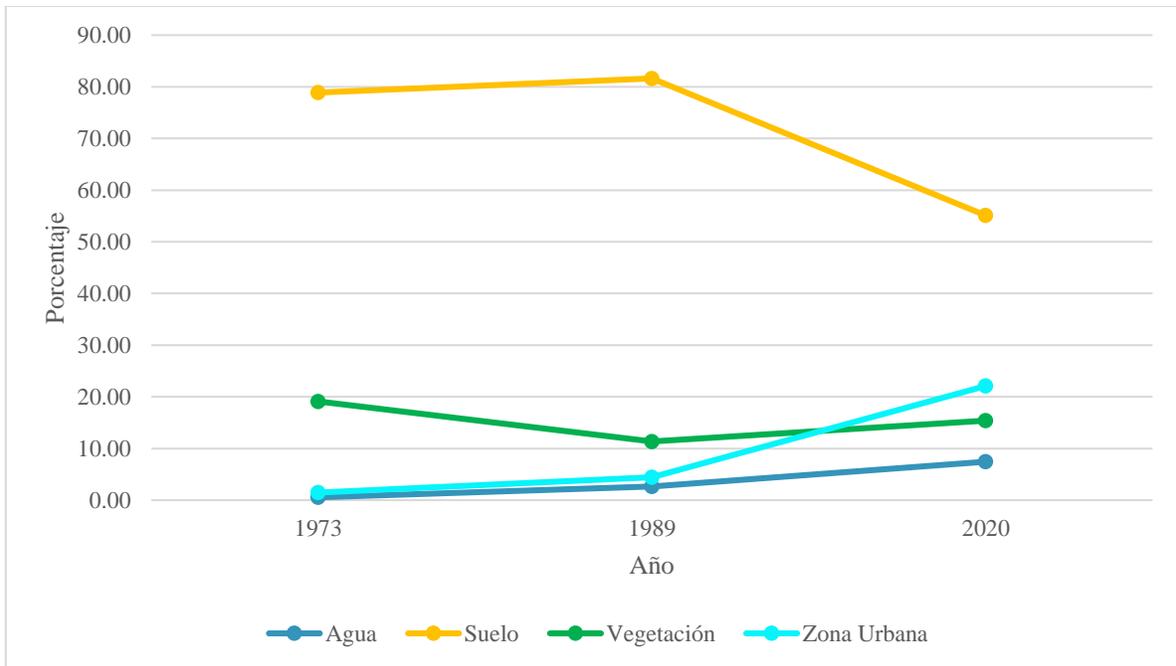
K=0.9

Tabla 14. Superficie por clase y polígono para cada año de análisis.

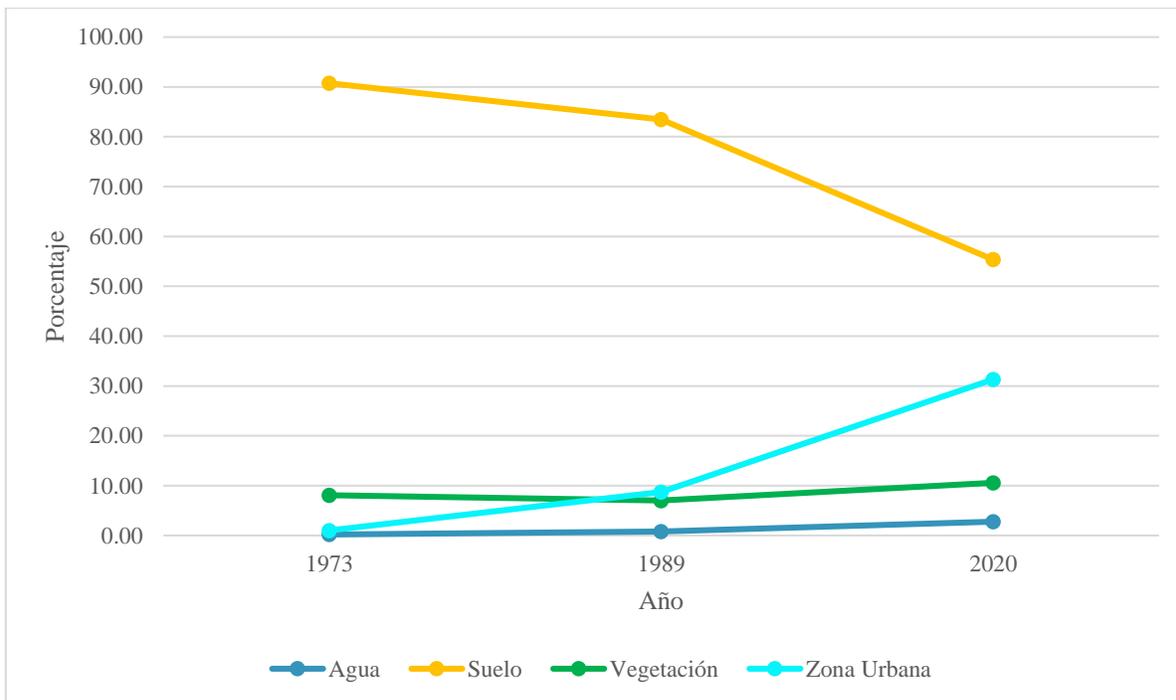
Clase	Polígono	1973 (ha)	1989 (ha)	2020 (ha)
Agua	Área de estudio	60.12	167.40	623.21
	ANPs	25.03	119.53	339.89
	SC	30.58	121.58	432.34
Suelo	Área de estudio	22,342.98	18,288.99	10,374.04
	ANPs	3,603.52	3,729.14	2,517.50
	SC	14,182.36	13,051.48	8,653.99
Vegetación	Área de estudio	1,616.00	1,275.04	2,076.34
	ANPs	873.01	518.85	701.97
	SC	1,258.87	1,096.97	1,651.38
Zona urbana	Área de estudio	624.40	4,912.08	11,569.91
	ANPs	67.16	201.19	1,009.36
	SC	159.50	1,361.29	4,893.60
Total	Área de estudio	24,643.51	24,643.51	24,643.51
	ANPs	4,568.72	4,568.72	4,568.72
	SC	15,631.31	15,631.31	15,631.31



Gráfica 3. Porcentaje de superficie por clase para cada año de análisis en el área de estudio.



Gráfica 4. Porcentaje de superficie por clase para cada año de análisis en Áreas Naturales Protegidas.



Gráfica 5. Porcentaje de superficie por clase para cada año de análisis en Suelo de Conservación.

## Análisis de resultados

El tamaño de píxel juega un papel importante al momento de realizar la clasificación supervisada. Un píxel de mayor tamaño implica una mayor cantidad de materiales contenidos en dicho píxel, de los cuales sobresale la respuesta espectral del material predominante en dicho píxel. En ocasiones, debido a la mezcla de materiales en un mismo píxel, la respuesta espectral dificultó la posibilidad de discriminar entre diferentes tonos de color definidos para cada material en la combinación de bandas seleccionado.

A pesar de que la resolución radiométrica del sensor MSS de Landsat 1 es la misma que en el sensor TM de Landsat 4, este último cuenta con mayor cantidad de píxeles debido a su mejor resolución espacial (80 m originalmente del sensor MSS a 30 m del TM), lo cual ayuda a discriminar a mayor detalle entre los materiales presentes en la imagen; Landsat 8 mejora aún más la calidad de las imágenes con mayor resolución radiométrica (en comparación con Landsat 4), facilitando la discriminación entre tonos de color y aumentando la cantidad de posibles clases para identificar en la imagen.

La exactitud general obtenida para la clasificación de 1973 es de 87%. De acuerdo con la metodología seguida, se verificaron 550 puntos distribuidos de manera aleatoria estratificada. Las clases con menor exactitud tanto del productor como del usuario fueron las clases de Agua y Zona urbana 2, ya que fueron las clases con menor superficie y, por lo tanto, contaron con menos puntos de verificación. Por esta razón, y para el caso específico de la clase de Agua, se adicionaron 10 puntos de verificación en el estudio para mejorar la representatividad y confiabilidad de los resultados. Al tener más puntos de verificación, se puede evaluar la precisión de la clasificación con mayor confianza.

Para 1989, se obtuvo una exactitud general del 96% con 625 puntos de verificación. Se obtuvieron las coordenadas UTM de cada punto de verificación para poder ser visualizado en imágenes satelitales de la fecha de estudio a través de Google Earth Pro. La clase con menor exactitud del productor fue Suelo 2, con 90% y la menor exactitud del usuario fue Zona urbana 2.

La exactitud obtenida en la clasificación de la imagen de 2020 fue, de igual manera, 96%. Se realizó la verificación punto por punto por medio de foto mapas, cartas de uso del suelo e imágenes satelitales y aéreas, visualizadas en Google Earth. La menor exactitud del productor obtenida fue de 88% para la clase de Suelo 2 y la menor exactitud del usuario fue de Zona urbana 2 con 88%. Ambas clases fueron las que más se confundieron entre sí. La Zona urbana 2 corresponde a zonas de baja densidad de viviendas, zonas rurales con calles sin pavimentar, terrenos grandes con porciones de tierra y cercanas a zonas agrícolas, mientras que el Suelo 2 corresponde a suelo sin vegetación aparente, principalmente agrícola.

El coeficiente kappa obtenido para cada año de estudio fue de 0.8, 0.9 y 0.9, respectivamente. La concordancia obtenida en los años de estudio significa que los datos obtenidos mediante la clasificación tienen un buen ajuste entre las imágenes clasificadas y los mapas verdad, debido solo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios. Un coeficiente kappa mayor a 0.8 es indicativo de que la clasificación dada no haya sido obtenida al azar (Landis y Koch, 1977).

Para este análisis y para poder comparar las clases en cada año de estudio, se agruparon las clases como: Agua, Suelo, Vegetación y Zona urbana. Se observa que para 1973 el mayor uso pertenece a Suelo, representando el 90.66% (22,342.98 ha) de la superficie total. La Vegetación, por el contrario, sólo representaba 6.56% (1,616 ha). Para esas fechas, se comenzaba a observar pequeñas concentraciones urbanas que representaban una superficie de 2.53% (624.4 ha), se localizan principalmente en los sectores centrales tanto de la alcaldía de Xochimilco, como Tláhuac y al este del municipio de Valle de Chalco Solidaridad. Los cuerpos de agua, incluyendo la Pista Olímpica de Remo y Canotaje en Xochimilco y pequeños cuerpos en los límites entre Tláhuac y Valle de Chalco Solidaridad, representaban tan solo el 0.24% (60.12 ha) de la superficie de estudio.

Para 1989 se observa un evidente cambio en la distribución de clases, reduciéndose en 16.5% (4,053.99 ha) la clase de Suelo con respecto a 1973, dando lugar a un aumento de la superficie urbana,

de representar 2.53% de la superficie del área de estudio a 19.93% (4,912.08 ha). La mayor parte del crecimiento se observa en alcaldía de Tláhuac, a las faldas de la Sierra de Santa Catarina. En menor proporción, se presentan asentamientos en Xochimilco, al suroeste de Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco. En el municipio de Valle de Chalco Solidaridad, las zonas urbanas se presentan en la zona noreste, de manera dispersa y con menor densidad que en Xochimilco y Tláhuac. Las zonas con vegetación tuvieron una reducción en su superficie de 21.1% (349.96 ha) con respecto a la 1973 y se presentan en la Sierra del Chichinautzin y al oeste del área de estudio, en la alcaldía de Xochimilco y de manera más dispersa en Tláhuac y Valle de Chalco Solidaridad. Se muestra un aumento de 178.5% (167.4 ha) en los cuerpos de agua, estos se encuentran en la zona de Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco y en los límites entre Tláhuac y Valle de Chalco Solidaridad.

En 2020, se muestra un cambio drástico del paisaje, con una notable y preocupante reducción la clase de Suelo del 43.3% (7,914.95 ha) con respecto a 1989, dando lugar a un aumento considerable de zonas urbanas, las cuales pasaron de representar el 19.93% (4,912.08 ha) a 46.95% (11,569.01 ha) en 2020. Estas zonas urbanas se encuentran, además de lo observado en 1989, en las faldas de la Sierra del Chichinautzin, al centro en las faldas de la Sierra de Santa Catarina, perteneciente a la alcaldía de Tláhuac. Se presenta un crecimiento significativo de zonas urbanas en el municipio de Valle de Chalco Solidaridad. Asimismo, se muestra un aumento de la Vegetación de 8.43% (2,076.34 ha) con respecto a la superficie total al suroeste de la zona de estudio, en la zona de Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco y al sur del municipio de Valle de Chalco Solidaridad en el Santuario del Agua Lagunas de Xico.

A pesar de la vocación agrícola de la zona de estudio y que, por esta razón puede existir variación de los datos de superficie en las clases de Suelo y Vegetación, dependiendo de la fase en la que se encuentre el cultivo, la clase de Vegetación tuvo un aumento de 1.87% (460.34 ha) de superficie dentro del área de estudio en el periodo de analizado, mientras que la clase de Suelo tuvo una disminución de 48.57% (11,968.94 ha). La clase de Zona urbana tuvo un aumento de 44.2% (10,

945.51 ha). Es decir, la superficie urbana pasó a ser el uso de mayor superficie dentro del área de estudio y esta disminución de Suelo se relaciona directamente con los asentamientos humanos.

Una característica que resalta en este estudio y contrario a lo que se pudiera pensar, dado el crecimiento de la mancha urbana, es el aumento en la superficie ocupada por cuerpos de agua a lo largo del periodo analizado, el cual tuvo un incremento más de 1000%, estos se encuentran en Xochimilco y especialmente en los límites entre Tláhuac y Valle de Chalco Solidaridad. De igual manera, se presentan acumulación de agua alrededor de la zona del Santuario del Agua Lagunas de Xico.

Por tal motivo, se indagó en la historia sobre los canales y lagos de la zona de estudio y se obtuvo información sobre la serie de acontecimientos que derivaron en esta situación. Aragón-Durand (2007), a partir de una recopilación de los relatos de Huerta (2000), Tortolero (1996) y Beltrán (1998), menciona que la construcción del ferrocarril de Morelos en 1878 promovió la agricultura comercial en la región del Valle de Chalco, gracias a la modernización de la agricultura (nuevas semillas, herramientas y mecanización), la inversión de capital y la fertilidad de la cuenca. Fue tal la importancia agrícola que, en 1895, Porfirio Díaz autoriza al empresario Iñigo Noriega la desecación del lago de Chalco (INAFED, 2010), accediendo así a una gran superficie de tierra altamente productiva, llevando el agua del lago de Chalco hacia el lago de Texcoco (Canal de la Compañía).

En 1914 se concluyeron obras hidráulicas para explotación de los manantiales de Xochimilco para abastecer a la Ciudad de México, además de la explotación mediante pozos para riego y consumo humano.

El gran desarrollo de la actividad agrícola en la zona debido a la desecación del lago provocó problemas en la asignación de extensiones de parcelas, comenzando a ser cada vez menos rentables para los ejidatarios la producción agrícola, por lo que empezaron a vender sus tierras entre 1940 y 1960. Debido a la cercanía con el centro de la Ciudad de México, a mitad de los años 70 y derivado

de la necesidad de suelo periurbano, comenzó el cambio de uso a suelo urbano (Aragón-Durand, 2007), sobre todo en el municipio de Valle de Chalco Solidaridad, atrayendo así a personas de ingresos medios y bajos que se desplazaron de la ciudad a la periferia (Mendoza Pérez, 2009).

Desde el año 2000, comienzan a crearse desarrollos inmobiliarios, trasladando la creación de vivienda al sector privado. El mayor crecimiento de estos desarrollos se da en el sexenio del presidente Fox en 2006 (García Balderas y Castañeda Villegas, 2013), modificando drásticamente el paisaje de la periferia de la ciudad.

Ambas características (extracción de agua y aumento de la mancha urbana en la zona de estudio) han causado graves hundimientos. Actualmente, existen zonas donde alcanza los 30 centímetros al año (Chaussard *et al.*, 2014). Este acelerado hundimiento diferencial dio lugar a la formación de una depresión topográfica localizada aproximadamente en el centro de la planicie, donde se está formando un nuevo lago por la acumulación de agua de lluvia y agua superficial, la cual ya no sale por gravedad a través del sistema de canales en la zona, formando así el nuevo lago de Tláhuac-Xico y los cuerpos de agua localizados en la ANP de Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco (Ortiz y Ortega, 2007).

Como se describió anteriormente, las zonas de Xochimilco, Tláhuac y Valle de Chalco Solidaridad cuentan con diversas declaratorias de conservación, teniendo así el 70% de la zona de estudio con algún carácter de protección.

En la actualidad, dentro de las ANPs la clase de Suelo representa 55.1% (2,517.50 ha), la Vegetación 15.36% (701.97 ha) y los cuerpos de agua 7.44% (339.89 ha). Las ANPs fueron declaradas entre los años 2003 y 2006 y, de acuerdo con las declaratorias publicadas en el DOF, se prohíbe el cambio de uso de suelo en estas zonas. El mayor aumento de zonas urbanas tuvo lugar en los últimos 40 años, con un incremento de 5 veces la superficie de 1989 a la actualidad (de 201.19 a 1,009.36 hectáreas).

Para el caso del SC, la clase de Suelo representa en la actualidad el 55.36% (8,653.99 ha) de la superficie del SC, la Vegetación el 10.56% (4,893.60 ha), los cuerpos de agua 2.77% (432.34 ha) y las zonas urbanas 31.31% (4,893.60 ha) de la superficie de estudio. De acuerdo con la declaratoria que determina la línea limítrofe entre el área de desarrollo urbano y el área de conservación ecológica, el destino de su zona de protección y los usos y destinos para el área de conservación ecológica y para los poblados del Distrito Federal (DOF, 1987), sólo es posible la construcción habitacional en zonas de uso agrícola, pecuario y forestal cuya densidad deberá ajustarse a 10 hab/has o 2 viv/has, además de que el decreto de programa general de ordenamiento ecológico del distrito federal (DOF, 2000), indica que las construcciones se deberán considerar la autosuficiencia en los servicios de agua potable y el manejo y disposición final de las aguas residuales y de los residuos sólidos e instalarse preferentemente en zonas sin vegetación natural. Estas condiciones presentadas en el DOF no se mantienen y es fácilmente observable las grandes concentraciones urbanas dentro del SC de la Ciudad de México.

## Conclusiones

El análisis del crecimiento de la mancha urbana mediante la utilización de imágenes satelitales es de gran utilidad debido al bajo coste que representa y a la fiabilidad de los resultados. Las características de los sensores utilizados marcan una diferencia en la exactitud obtenida, sobre todo para la imagen de 1973, correspondiente a Landsat 1 con sensor MSS, donde la resolución espacial y radiométrica, dificultaron la identificación de los materiales contenidos en la imagen y sólo se pudieron discriminar entre 8 clases diferentes, mientras que en los sensores TM de Landsat 4 y OLI de Landsat 8, se pudieron discriminar entre 13 clases diferentes, lo cual demuestra el gran avance de los sensores a través del tiempo, mejorando la capacidad de análisis, precisión, cobertura y temporalidad en el monitoreo de los usos de suelo. Es posible mejorar los resultados obtenidos mediante la utilización de imágenes de alta resolución espacial (de decenas de metros y hasta centímetros) y espectral (hiperespectrales). Aunque actualmente estas imágenes presentan un alto costo, su uso en conjunto con otras técnicas de clasificación, como el desmezclado espectral (*Spectral Mixture Analysis*), puede mejorar los resultados al analizar y clasificar a través de las firmas espectrales “puras” o píxeles más probables que contengan información de un solo material y así estimar la proporción de ese material en el total del área de estudio (Camps-Valls *et al.*, 2012).

Teniendo en cuenta las limitaciones de los sensores, la verificación exhaustiva de cada punto de evaluación mediante foto mapas, cartas de uso del suelo y vegetación y el uso de las imágenes provistas por Google Earth, aumentó significativamente la exactitud obtenida, donde las herramientas mencionadas aportan valor al trabajo realizado. Es indispensable contar con mapas verdad lo más cercanos a las fechas de estudio para poder corroborar y contrastar lo obtenido en las clasificaciones realizadas y la realidad.

Los coeficientes kappa, junto con la exactitud obtenida en la matriz de error, muestran que los resultados obtenidos son confiables y que pueden ser utilizados en la creación de instrumentos de

planeación como atlas de riesgos municipales y programas de desarrollo urbano, así como para la evaluación de las declaratorias de protección en la zona de estudio.

El análisis temporal muestra claramente el aumento de la mancha urbana sobre el suelo desnudo a lo largo del tiempo, teniendo un aumento en la ocupación del área de estudio de 2.53% a 46.95% entre 1973 y 2020, correspondiente a un crecimiento promedio anual de 232 ha, concordando con el acelerado crecimiento que ha tenido la Ciudad de México y la Zona Metropolitana desde los años de sesenta. Ha llegado a tal punto la necesidad de vivienda que es posible observar la presencia de un conjunto habitacional dentro de uno de los cráteres del volcán Xico, mientras que el otro cráter es utilizado para agricultura.

En el caso de las ANPs y SC, es posible observar un incremento de zonas urbanas dentro de estos polígonos, teniendo un incremento de 401.5% (808.17 ha) en ANP y 259.4% (3,532.31 ha) en SC, entre 1989 y 2020. Es alarmante que entre estos años hubiera un aumento considerable de zonas urbanas o construcciones aisladas, ya que los objetivos planteados para el SC, entre otros, es limitar el crecimiento de la mancha urbana para lograr el balance ecológico de la Ciudad de México y proporcionar áreas de recreación y esparcimiento, así como rescatar áreas agrícolas y forestales degradadas (DOF, 1987), mientras que las ANPs tienen como función principal mantener las cualidades originales de estos sitios, protegiendo la flora y la fauna que radica en dichas zonas, y en el caso de parques estatales, mantener la belleza y utilizarlas con fines recreativos, siempre que se conserven estas importantes áreas (CONABIO, 2020).

Una de las características principales del SC es que se presentan zonas de transición, las cuales son zonas de recargas de acuíferos de gran importancia para la Ciudad de México y Estado de México. A su vez, la zonificación geotécnica de CENAPRED delimita estas zonas de transición, asociándolas al peligro sísmico que existe en estas, así como en la zona lacustre, las cuales presentan depósitos blandos y lacustres con alta compresibilidad con alto riesgo sísmico y de subsidencia. Aunque este

estudio no tiene como objetivo el análisis de riesgos, aporta a la justificación de la importancia de limitar en mayor medida la urbanización dentro de los polígonos de SC y ANPs.

La aparición del cuerpo de agua denominado como Laguna de Tláhuac-Xico muestra que el aumento de la superficie ocupada por este cuerpo de agua será inevitable y de seguir incrementando la mancha urbana sobre el suelo y, en el caso de la zona de estudio, en campos agrícolas en zonas lacustres, incrementarán los riesgos de inundaciones en zonas urbanas.

La percepción remota y el análisis de cambio de uso de suelo son herramientas muy útiles para monitorear el crecimiento urbano y su impacto en las Áreas Naturales Protegidas (ANPs) y el Suelo de Conservación (SC). Al identificar áreas que están siendo afectadas por el crecimiento urbano, se pueden tomar medidas para limitar este crecimiento y proteger las áreas naturales. Además, estas técnicas también permiten evaluar los cambios en la cobertura del suelo y el uso del suelo a lo largo del tiempo, lo que puede proporcionar información valiosa para la conservación y protección de estas áreas. Por ejemplo, el análisis de cambio de uso de suelo y vegetación puede ayudar a identificar áreas que están siendo afectadas por la deforestación, la desertificación o la degradación del suelo. Esta información puede ser utilizada para implementar medidas de conservación y restauración en estas áreas, con el objetivo de proteger la flora y fauna que habitan en ellas.

## Recomendaciones

En este sentido, se recomienda la actualización de los Programas Delegacionales de Desarrollo Urbano de Xochimilco y Tláhuac, cuyas últimas publicaciones son del año 2005 y 2008, respectivamente.

Además, de acuerdo con los programas de desarrollo urbano (GODF, 2005, 2008; PMDU, 2022), así como los Atlas de Peligros y Riesgos de Xochimilco (Instituto de Geofísica *et al.*, 2016); de Tláhuac (Instituto de Geofísica, 2014); y de Valle de Chalco Solidaridad (Protección Civil del Estado de México, 2019) y lo observado en este estudio, se recomienda:

- Actualización de la zonificación secundaria de las alcaldías y municipio, para determinar los usos urbanos actuales.
- Reubicación de los asentamientos con uso no habitacional, principalmente aquellos que presenten una baja densidad poblacional.
- Aumento de la tenencia de la tierra para uso habitacional, para distribuir el crecimiento futuro a estas zonas.
- Monitoreo constante de las ANPs y SC, así como la creación de un SIG en el que se actualice en tiempo real los cambios y afectaciones de la zona de estudio.
- Contención de los asentamientos irregulares mediante la vigilancia constante de estas importantes zonas ecológicas y pago por servicios ambientales.
- Obras de contención contra inundaciones como canales para conducir el agua a sitios de almacenamiento.
- Disminución de la extracción de agua subterránea.

Es posible utilizar dichos resultados para estudios futuros de análisis temporal, donde se puedan evaluar de mejor manera la correcta ejecución de las zonas de conservación, programas urbanos y de riesgo para la zona de la subcuenca de Chalco-Xochimilco, la cual debe mantener y preservar a través

del tiempo, para seguir proveyendo los servicios ambientales, culturales y agrícolas que son de gran valor para los habitantes de la Ciudad de México.

## Referencias

- Addabbo, P., Focareta, M., Marcuccio, S., Votto, C., & Ullo, S. L. (2016). Land cover classification and monitoring through multisensor image and data combination. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 902-905.
- Aggarwal, S. (2004). Principles of remote sensing. *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology*, 23, 23-28.
- Aragón-Durand, F. (2007). Urbanisation and flood vulnerability in the peri-urban interface of Mexico City. *Disasters*, 31(4), 477-494.
- Aranda Sánchez, M. (2004). Ficha Informativa de los Humedales Ramsar (2004).
- Arce, J. L. (2015). Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 123-143.
- Ariza, A., Roa, O. J., Serrato, P. K., & León Rincón, H. A. (2018). Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano. *Perspectiva Geográfica*, 23(1), 105-122.
- Beltrán, T. (1998). La desecación del lago (ciénega) de Chalco. *Cuadernos Municipales*.
- Bezaury-Creel, J. E., Torres, J. F., Ochoa-Ochoa, L. M., Castro-Campos, M., & Moreno, N. (2009). Base de Datos Geográfica de Áreas Naturales Protegidas Municipales de Mexico-Versión 2.0. *The Nature Conservancy/Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad/Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas*.
- Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., Díaz-Molina, O., Sánchez-Zamora, O., & Carande, R. E. (2008). Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *Geological Society of America Bulletin*, 120(11-12), 1556-1566.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford Press.
- Camps-Valls, G., Tuia, D., Gómez-Chova, L., Jiménez, S., & Malo, J. (2012). *Remote Sensing Image Processing* (1 ed.). Springer Cham. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-031-02247-0>
- Caramillo Sarabia, R., Maurer Walls, F., & Ulacia Balmaseda, R. (2013). *LAGO TLÁUAC - XICO. REGENERACIÓN DE UN SISTEMA HIDRICO URBANO*. Ciudad de México: Facultad de Arquitectura, UNAM. Recuperado el 1 de marzo de 2020, de [http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/academicos/arquitectura\\_urbanismo/CamarilloMaurerUlacia\\_PresTesis.pdf](http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/academicos/arquitectura_urbanismo/CamarilloMaurerUlacia_PresTesis.pdf)
- CENAPRED. (2015). *Zonificación geotécnica de la Ciudad de México*. Obtenido de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/centro-nacional-de-prevencion-de-desastres/resource/62b9fd58-1755-4bce-9e1e-2c33a5d0e754>
- Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140, 94-106.

- Chavez Jr, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 24(3), 459-479.
- Chávez, R. E., Cifuentes-Nava, G., Tejero, A., Hernández-Quintero, J. E., & Vargas, D. (2014). Special 3D electric resistivity tomography (ERT) array applied to. *Geofísica internacional*, 53(4), 425-434.
- CONABIO y SEDEMA. (2016). *La biodiversidad en la Ciudad de México* (Vol. III). México: CONABIO/SEDEMA.
- Congalton, R. G. (1991). A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote sensing of environment*, 37(1), 35-46.
- Corona, J. P. (2017). URBANIZACIÓN Y CONFLICTOS AMBIENTALES EN SUELO DE CONSERVACIÓN DE XOCHIMILCO, CIUDAD DE MÉXICO. *Creecer empresarial journal of management and development*(1).
- Covarrubias. (2000). *Proyecto para el diseño de una estrategia de gestión de la calidad del aire en el Valle de México, 2001-2010*. MIT.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1987). DECLARATORIA DE LA LINEA LIMITROFE ENTRE EL AREA DE DESARROLLO URBANO Y EL AREA DE CONSERVACION ECOLOGICA.
- DODF. (2000). *DECRETO DE PROGRAMA GENERAL DE ORDENAMIENTO ECOLOGICO DEL DISTRITO FEDERAL*.
- DODF. (2003). *DECRETO POR EL QUE SE APRUEBA EL PROGRAMA GENERAL DE DESARROLLO URBANO DEL DISTRITO FEDERAL*.
- Espinosa, A. C., & Mazari Hiriart, M. (2007). Pueblos indígenas de México y agua: xochimilcas. *Atlas de culturas del agua en América Latina y el Caribe*.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica. *BOLETIN DE LA SOCIEDAD GEOLOGICA MEXICANA*, 53(1), 84-92.
- Galicia, L., García, R. A., Gómez, L., & Ramírez, M. I. (2007). Cambio de uso del suelo y degradación ambiental. *Ciencia*, 58(4), 50-59.
- García Balderas, G., & Castañeda Villegas, H. (2013). El capital inmobiliario como planificador del territorio en México. Caso de estudio: Tecámac, Estado de México. *La política de ordenamiento territorial en México: de la teoría a la práctica*, 599-622.
- García Rodríguez, M. d., Sanz Donaire, J. J., Pérez González, M., & Navarro Madrid, Á. (2012). *Guía práctica de teledetección y foteointerpretación*. Universidad Complutense de Madrid.
- García, G. (1991). Dinámica industrial de la ciudad de México, 1940-1988. *Estudios demográficos y urbanos*, 6(1), 209-214.
- GDF. (2000). Programa General de Ordenamiento Ecológico. *GDF, SMA, Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural y Dirección Ejecutiva de Ordenamiento Ecológico*, 1.
- GOCDMX. (2000). *LEY AMBIENTAL DE PROTECCIÓN A LA TIERRA EN EL DISTRITO FEDERAL*. Distrito Federal.

- GOCDMX. (2018). *REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL*.
- GODF. (2005). *PROGRAMA DELEGACIONAL DE DESARROLLO URBANO DE XOCHIMILCO*.
- GODF. (2008). *Programa Delegacional de Desarrollo Urbano en Tláhuac*.
- Gómez, R. A. (2010). *Estudios sobre los remanentes de cuerpos de agua en la Cuenca de México*. México D.F: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Huerta, R. (2000). Agua, bosques y capitalismo: la región de Chalco, 1890-1940. *La construcción social de un territorio emergente: el Valle de Chalco*, 65-86.
- INAFED. (2010). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Obtenido de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15122a.html>
- INEGI. (2014). *Modelo Cartográfico de Humedales Escala 1:50000*.
- INEGI. (2017). INEGI PRESENTA CARTA DEL USO DE SUELO Y VEGETACIÓN SERIE V. *COMUNICADO DE PRENSA NÚM. 535/17*, (pág. 11).
- INEGI. (2019). *Producto Interno Bruto por Entidad Federativa. Año base 2013*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.aspx?pr=17&vr=6&in=2&tp=20&wr=1&cn=2>
- INEGI. (2020). *Marco Geoestadístico. Censo de Población y Vivienda 2020*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463807469>
- INEGI. (2021). *Censo de Población y Vivienda 2020*.
- INEGI. (2021). *Panorama sociodemográfico de Ciudad de México : Censo de Población y Vivienda 2020*. México.
- Instituto de Geofísica. (2014). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México. Actualización de los mapas de riesgos. Tláhuac*. Ciudad de México.
- Instituto de Geofísica, SEDATU, PRAH. (2016). *ATLAS DE PELIGROS Y/O RIESGOS DE LA DELEGACIÓN DE XOCHIMILCO 2015*. Ciudad de México.
- IPCC. (2012). *Glossary of terms. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. (C. V.-K. Field, Ed.) Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Juárez-Camarena, M., Auvinet-Guichard, G., & Méndez-Sánchez, E. (2016). Geotechnical zoning of Mexico Valley subsoil. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 17(3), 297-308.
- Kokaly, R. F., Clarck, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Pearson, N. C., . . . Klein, A. J. (2017). Aspen Leaf. *USGS Spectral Library Version 7: U.S. Geological Survey Data Series 1036,61 p*. Obtenido de <https://doi.org/10.3133/ds1035>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. *Biometrics*, 363-374.
- Lesser Illades, J. M., Sánchez Díaz, F., & González Posadas, D. (1990). Aspectos geohidrológicos de la ciudad de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 52-61.

- LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE (LGEEPA). (2 de Marzo de 2023). *DOF. Última reforma publicada DOF 08-05-2023*. Obtenido de <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
- Lillesand, T., Ralph, W. K., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Liu, J. G., & Manson, P. J. (2013). *Essential image processing and GIS for remote sensing*. John Wiley & Sons.
- Marsal, R. J., & Mazari, M. (1969). *El subsuelo de la Ciudad de México*. México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mather, P., & Tso, B. (2016). *Classification methods for remotely sensed data*. CRC press.
- Mendoza Pérez, C. (2009). La emergencia de la migración internacional en la periferia empobrecida de la ciudad de México: Valle de Chalco-Solidaridad, Estado de México. *Migraciones internacionales*, 5(2), 5-37.
- NASA. (7 de Mayo de 2020). *Landsat Science*. Obtenido de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- OECD. (2021). "Metropolitan areas". *OECD Regional Statistics (database)*. doi:<https://doi.org/10.1787/data-00531-en>
- Ortiz Zamora, D. D., & Ortega Guerrero, M. A. (2007). Origen y evolución de un nuevo lago en la planicie de Chalco: implicaciones de peligro por subsidencia e inundación de áreas urbanas en Valle de Chalco (Estado de México) y Tláhuac (Distrito Federal). *Investigaciones geográficas*(64), 26-42.
- PMDU. (2022). *Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Valle de Chalco Solidaridad 2022*.
- Pradilla Cobos, E. (2005). Zona metropolitana del Valle de México: megaciudad sin proyecto. *Ciudades: Revista del Instituto Universitario de Urbanística de la Universidad de Valladolid*(9), 83-104.
- Pradilla Cobos, E., Camas Reyes, F. J., Larralde Corona, A., & Márquez López, L. (2000). La regulación del crecimiento territorial de la Zona Metropolitana del Valle de México. *Papeles de población*, 6(23), 27-44.
- Protección Civil del Estado de México. (2019). *Atlas de Riesgos Valle de Chalco Solidaridad*.
- Ronald Eastman, J. (2012). *IDRISI Selva. Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Clark University.
- SADER. (2018). *Las chinampas, historia, cultura y seguridad alimentaria*. Obtenido de [https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/las-chinampas-historia-cultura-y-seguridad-alimentaria#:~:text=Las%20chinampas%20fueron%20reconocidas%2C%20por,Patrimonio%20Agr%C3%ADcola%20Mundial%20\(SIPAM\).&text=Adicional%20a%20su%20importancia%20productiva,d](https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/las-chinampas-historia-cultura-y-seguridad-alimentaria#:~:text=Las%20chinampas%20fueron%20reconocidas%2C%20por,Patrimonio%20Agr%C3%ADcola%20Mundial%20(SIPAM).&text=Adicional%20a%20su%20importancia%20productiva,d)
- SAGARPA. (31 de Mayo de 2021). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Obtenido de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

- SEDATU, CONAPO e INEGI. (2018). *Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2015* (Primera ed.). México.
- SEDEMA. (2018). *Datos Abiertos Ciudad de México*. Obtenido de Suelo de Conservación.
- SEMARNAT. (2015). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde* (2015 ed.). México: Semarnat.
- Stephan-Otto, E. (1998). Plan de manejo integral de la zona chinampera. *Ciclo de Conferencias: "Las Chinampas y Los Canales de Xochimilco y Tláhuac"*, 1-33.
- Story, M., & Congalton, R. G. (1986). Accuracy assessment: a user's perspective. *Photogrammetric Engineering and remote sensing*, 52(3), 397-399.
- Toledo, V. M., & Barrera-Bassols, N. (2008). *La memoria biocultural: la importancia ecológica de las sabidurías* (Vol. 3). Icaria editorial.
- Torres Bernardino, L. (2017). LA GESTIÓN DEL AGUA POTABLE EN LA CIUDAD DE MÉXICO. *LOS RETOS HÍDRICOS DE LA CDMX: GOBERNANZA Y SUSTENTABILIDAD*.
- Tortolero Villaseñor, A. (1991). *Haciendas, pueblos y gobierno porfirista: los conflictos por el agua en la región de Chalco*. Universidad Iberoamericana.
- USGS. (2019). *Landsat Missions Timeline*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/media/images/landsat-missions-timeline>
- Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz Gallegos, J. R., Mayorga Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., . . . Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*(62), 21-37.