

Analysis of land use change by remote sensing in the municipality of San Pedro Mixtepec District 22, Mexico, in relation to San José de Cúcuta, Colombia

Luisa Fernanda Ramírez Ríos¹, Yudith Yamile Ortega Contreras², Antonio Navarro Durán²,
Dorance Becerra Moreno², Carlos Alberto García Lopez³

¹ Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia.

² Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

³ División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Puerto Escondido, México.



How to cite this article: L. Ramírez, Y. Ortega, A. Navarro, D. Becerra C. García, "Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de San Pedro Mixtepec Distrito 22, México, en relación con san José de Cúcuta, Colombia", *Ing-Nova*, vol. 3, no. 2, pp. 123-140, Jul. 2024.

<https://doi.org/10.32997/rin-2024-4945>

Received: 14 de junio de 2024

Reviewed: 27 de junio de 2024

Accepted: 3 de julio de 2024

Corresponding author:

Luisa Fernanda Ramírez Ríos

lfernandaramirez@unillanos.edu.co

Editor: Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

Copyright: © 2024 L. Ramírez, Y. Ortega, A. Navarro, D. Becerra C. García. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.



ABSTRACT

Land use change poses a significant global issue and is a crucial contributor to climate change. A comparative study was conducted using satellite imagery from 2000, 2010, and 2021 to contrast land use change between San Pedro Mixtepec, Mexico, and San Jose de Cucuta, Colombia. The study employed the Digital Satellite Image Processing methodology proposed by Galindo in 2014, utilizing a supervised classification technique with the MAXLIKE classifier. The categories identified were forest, infrastructure, and agricultural areas. The forest area was validated through data provided by the National Institute of Statistics and Geography (INEGI) and the Institute of Hydrology, Meteorology, and Environmental Studies (IDEAM). The results revealed significant damage to ecosystem services, particularly climate regulation and biodiversity, which are necessary for human well-being. The direct impact of land-use change on these services emphasize the need for addressing this problem on the government agenda.

Keywords: climate change; coverage; ecosystem services; soil; tropical.

Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de San Pedro Mixtepec Distrito 22, México, en relación con san José de Cúcuta, Colombia

RESUMEN

El cambio de uso de suelo es una grave preocupación global y un impulsor clave del cambio climático. Este estudio comparó el cambio en el uso de suelo entre San Pedro Mixtepec, México, y San José de Cúcuta, Colombia, utilizando imágenes satelitales de 2000, 2010 y 2021. Se empleó la metodología de Procesamiento Digital de Imágenes de Satélite propuesta por Galindo en 2014, con una clasificación supervisada mediante el clasificador MAXLIKE. Las categorías identificadas fueron forestal, infraestructura y áreas agrícolas. Se validó la superficie forestal utilizando datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Los resultados mostraron daños a los servicios ecosistémicos, especialmente la regulación climática y la biodiversidad, esenciales para el bienestar humano. El cambio de uso de suelo tiene un impacto directo en estos servicios y resalta la importancia de abordar este problema en la agenda gubernamental.

Palabras clave: Cambio climático; Cobertura; Ecosistémicos; Suelo; Tropical.

1. Introducción

El cambio de uso de suelo y el cambio climático son los factores más importantes que inciden en la pérdida de la biodiversidad a nivel planetario (IPBES, 2018). De manera general para Latinoamérica, la transformación de la vegetación arbórea a campos agrícolas (i.e., agricultura y ganadería) es la principal causa de la pérdida de bosques (CEPAL, 2021). Si bien la tasa de la deforestación es alta, también se ha observado un incremento de cobertura forestal como resultado el abandono de campos agropecuarios, lo anterior puede ocasionar el desarrollo de vegetación secundaria, también conocido como bosque secundario, cuando dentro de ésta se establecen árboles (Castillo-Santiago, 2009). En la actualidad la vegetación secundaria, sensu lato, representa la mayor parte de la cobertura vegetal en el planeta y es reconocida por sus bienes y servicios (FAO, 2021, Queiroz et al. 2014, Rozendaal et al. 2019).

En este marco, el estudio de la dinámica de uso de suelo puede apoyar en la gestión y planificación de los procesos urbanos puede ayudar a generar propuestas para un desarrollo sostenible en los programas de ordenamiento territorial (Romero-Padilla & Martín Hernández-Juárez, 2022). Las investigaciones relativas a los cambios de usos y coberturas de suelo son una información imprescindible para la planificación de los territorios, debido a la importancia para detectar distribuciones en el espacio y tiempo (Bocco Gerardo et al., 2001), en este enfoque la teledetección y el uso de sistemas de información geográfica han demostrado obtener buenos resultados al monitorear patrones y hacer un mapeo con ellos (Li, 2012).

Tanto la cubierta vegetal como el uso del terreno son dos componentes importantes para la toma de decisiones respecto al uso del suelo, el primer concepto lo aplica a aquellos objetos de origen natural hablese de montañas, ríos, lagos, los creados por el hombre como las carreteras o ciudades, y el segundo concepto relativo a la actividad antrópica que se desarrolla en la superficie del planeta Tierra, con el objetivo de producir los bienes y servicios que demanda la sociedad (Leija-Loredo et al., 2000).

Históricamente la degradación y la fragmentación de los bosques secos tropicales han provocado numerosas consecuencias ecológicas, se ha creado un mosaicos de parches aislados de bosque, los cuales pierden la conectividad y, por consiguiente, interrumpen el flujo de energía vital para los organismos que ahí habitan (Ceballos Gerardo et al., 2010).

Esto nos habla de un ecosistema altamente resiliente, es decir, que el bosque seco tropical posee la capacidad de sobreponerse tras haber sido perturbado, consiguiendo regresar a un estado, estructura, composición y funcionamiento adecuados (Flores et al., 2018).

A pesar del panorama poco alentador, estudios recientes han hecho evidente que, a pesar de que las presiones simultáneas a las que se ha visto sometido, el bosque seco tropical es un ecosistema altamente adaptable. Incluso se ha observado que puede ser capaz de recuperar su riqueza y diversidad tras haber pasado un evento de disturbio logrando una composición similar o la que tenía en su estado natural (Derroire et al., 2016).

1. Materiales y métodos

Fase de gabinete

El monitoreo de los cambios en la recuperación de un sitio requiere de registros a largo plazo (Scheffer, Carpenter, Dakos y van Nes, 2015) y escalas temporales y espaciales correspondientes a la dinámica del sistema estudiado (Arroyo-Rodríguez, et al., 2017a; Scheffer et al., 2015). Por ende, las herramientas tecnológicas que pueden satisfacer esta necesidad se encuentran en la percepción remota, a través de los productos que proporciona (e. g., imágenes satelitales, fotografías aéreas) (De Keersmaecker et al., 2015; Dupuy et al., 2012; Hirota, Holmgren, Van Nes y Scheffer, 2011; Scheffer et al., 2015).

Se utilizó imágenes de satélite, recurso de percepción remota que almacena la información en un formato de celdas dentro de un elemento denominado pixel (Bakker et al., 2009), bajo el procesamiento digital de imágenes de satélite (Galindo et al., 2014), que incluye cuatro momentos asociados al tratamiento de los datos satelitales para la generación de los datos, lo cual permite principalmente la generación de mapas para caracterizar las áreas de estudio.

Áreas de estudio

El municipio de San Pedro Mixtepec Distrito 22 (Figura 1a), se localiza en la región costa del Estado de Oaxaca, en las coordenadas 97°04'58" longitud oeste, 15°58'58" latitud norte, a una altitud que va desde los 0 a los 220 msnm. Limita al norte con el municipio de San Gabriel Mixtepec, al sur con el Océano Pacífico, al este con el municipio de Santa María Colotepec y al oeste con los municipios de Santos Reyes Nopala y San Pedro Tututepec, por su parte el municipio de San José de Cúcuta se localiza al Nororiente de Colombia, en la Cordillera Oriental a los 7° 30' de latitud norte con respecto al Meridiano de Bogotá y 72° 30' de longitud al Oeste de Greenwich, al norte colinda con el municipio de Tibú; por el occidente con el municipio del Zulia, al sur con Villa del Rosario, Los Patios, y al oriente con el país de Venezuela (Figura 1b).

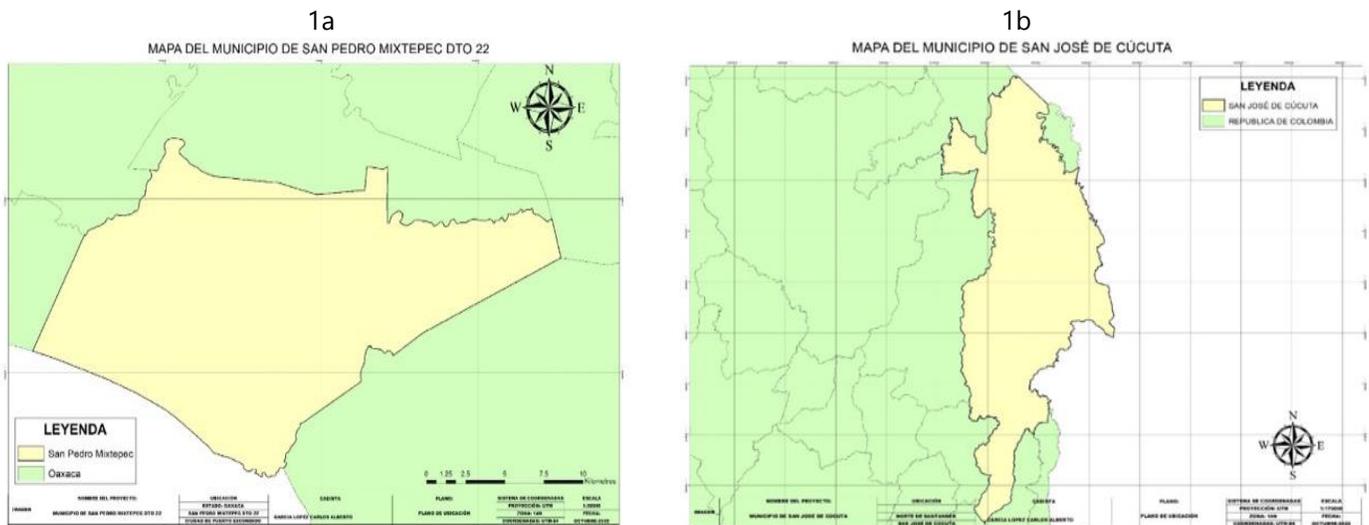


Figura 1. a) Mapa del Municipio de San Pedro Mixtepec, México; b) Mapa del Municipio de San José de Cúcuta, Colombia.

Clima

En función de la clasificación de Köppen, modificado por Enriqueta García, la fórmula climática y la descripción del tipo de clima que se presenta en San Pedro Mixtepec es un clima Cálido subhúmedo (Aw2), con una temperatura media anual mayor de 22°C, una precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm y una precipitación promedio anual de 1200 mm. De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2022) el clima de Cúcuta es cálido, con un promedio de lluvia de 878 mm anuales y una temperatura media anual de 25.5 °C y presenta regímenes de lluvias de tipo bimodal.

Edafología

Los tipos de suelos que predomina en San Pedro Mixtepec son: Regosol-éutrico: el cual presenta un color pardo, con gris o amarillo. Las texturas varían de arena a migajón arcilloso-arenoso, Cambisol -crómico: son de color pardo oscuro a rojo y saturación de bases mayor de 50 %. El pH fluctúa de muy alcalino a ácido de acuerdo con la profundidad de horizontes. La capacidad de intercambio catiónico varía de bajo a moderado, el Litosol: son suelos menores de 10 cm de profundidad. El color pardo oscuro, pardo grisáceo oscuro y negro. Feozem-haplico: sus colores son de color pardo grisáceo, gris o a veces negro y a mayor profundidad pardos con tonos amarillentos o rojizos, y, Solonchak-glético: presentan alta concentración de sales y tienen en el subsuelo un horizonte en el que se estanca el agua (horizonte glético) es de color gris a azulado que al exponerse al aire se mancha de color rojo (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación et al., 2008).

Para San José de Cúcuta, el mapa de susceptibilidad de la variable suelos presenta un 30,43% de unidades cartográficas donde se encuentran registrados movimientos en masa; están presentes los órdenes de suelos inceptisoles y entisoles que presentan una evolución moderada a baja, los cuales son más susceptibles a movimientos en masa, se desarrollan en zonas principalmente con paisajes de montaña (21,73%), con material parental compuesto por arcillas, limolitas e inclusiones de lutitas y areniscas, estos materiales desempeñan un papel muy importante a la hora de dar estabilidad o ruptura a los taludes; las pendientes van del 25 al 50%, en lo que provoca mayor facilidad para que se presenten estos movimientos (Municipio de San José de Cúcuta., 2017).

Definición y contexto actual del Bosque seco tropical (BST)

Los BST pueden nombrarse de diferentes maneras en función de la precipitación, la estacionalidad, longevidad del follaje, estructura de la vegetación o bien, el sustrato en el cual se establecen (Murphy & Lugo, 1986). Si bien es cierto que, en la literatura también se pueden denominar bosques de árboles bajos (short tree forest), (Gentry, 1942); bosques secos, bosque tropical deciduo, bosque estacional deciduo, selva baja caducifolia, bosque tropical caducifolio o bosque tropical estacionalmente (Guerra-Martínez et al., 2020).

Bosques que se establecen en regiones tropicales, donde se presentan varios meses de sequía al año (Holdridge, 1967), los bosques secos tropicales presentan un intervalo de precipitación media de 700 a 1200 mm anuales (Miranda, 1963), la temperatura anual mínima es de 20°C, y presentan un número mínimo de 5 a 8 meses secos (Rzedowski, 2006).

Este tipo de vegetación está dominada por árboles y arbustos de alto valor alimenticio para el ganado de entre los que destacan las leguminosas ricas en proteínas, como el 'cocuite' (*Gliricidia sepium*), el 'palo dulce' (*Evsennhardtia polystachia*), la 'acacia' (*Acacia spp.*) y la 'pata de vaca' (*Bahuinia sp.*) y se caracteriza por albergar una gran cantidad de especies de flora y fauna (Rzedowski, 2006).

Se puede considerar a los BTS como los bosques que presentan una precipitación media anual entre 250 mm y 2000 mm (Murphy y Lugo, 1986), una temperatura media anual mínima de 17 °C, tres meses de sequía, en la cual, la mayoría de los árboles pierden sus hojas (Rzedowski, 2006) por ende, en función de las características que definen el bosque seco tropical, se diagnostica que San Pedro Mixtepec, México, como San José de Cúcuta, albergan componentes de dicho ecosistema (Tabla 1).

Los BTS se encuentran entre los ecosistemas más amenazados en el mundo, ya que 97% están sometidos a disturbios que pueden provocar su deterioro o eliminación (Janzen, 1988; Miles et al., 2006; Mooney, 2011). Los disturbios más recurrentes son las actividades agropecuarias, el cambio climático, los incendios, la deforestación y los asentamientos humanos (Maass, 1995; Miles et al., 2006).

No obstante, en las últimas décadas y en diversas regiones del mundo, la caída de las actividades agropecuarias causada por los cambios socioeconómicos (e. g., migración, urbanización, crecimiento poblacional) y por una baja productividad del suelo ha favorecido el abandono de las tierras y la recuperación de los bosques (Chazdon, 2014; Galicia, Zarco-Arista, Mendoza-Robles, Palacio-Prieto y García-Romero, 2008; Hecht, Kandel, Gomes, Cuellar y Rosa, 2006), a tal grado que estos bosques en recuperación, mejor conocidos como bosques secundarios, han aumentado considerablemente en superficie alrededor del mundo (Wright y Muller-Landau, 2006). Frente a los disturbios, los ecosistemas poseen una propiedad que les permite sobreponerse a la modificación de sus atributos (Rykiel, 1985). Esta propiedad se denomina resiliencia ecológica y presenta dos componentes reconocibles: la resistencia y la recuperación (Lloret, Keeling y Sala, 2011). La resistencia le otorga a un ecosistema la capacidad de soportar el impacto inmediato de un disturbio exógeno, mientras que la recuperación consiste en el restablecimiento de los atributos afectados (e. g., estructura, diversidad) después de un disturbio (Lloret et al., 2011; Hodgson et al., 2015).

Tabla 1. Especies representativas del bosque seco tropical para ambos municipios

San Pedro Mixtepec, México.	San José de Cúcuta, Colombia.
<i>Bursera simaruba</i>	<i>Handroanthus chrysanthus</i>
<i>Leucaena leucocephala</i>	<i>Astronium graveolens</i>
<i>Ceiba pentandra</i>	<i>Ceiba pentandra</i>
<i>Crescentia cujete</i>	<i>Crescentia cujete</i>
<i>Phitecellobium dulce</i>	<i>Phitecellobium dulce</i>
<i>Prosopis laevigata</i>	<i>Samanea saman</i>
<i>Swietenia macrophylla</i>	<i>Zanthoxylum caribaeum</i>

Delimitación de las áreas de estudio

Se definió el área de estudio a mano alzada (Figura 2a), con el nombre de San Pedro Mixtepec, México, la cual fungió como base para realizar la descarga de las imágenes de los diferentes años de interés. Posteriormente, con el mismo proceso a mano alzada se delimitó el polígono de Cúcuta (Figura 2b), siendo base para realizar la descarga de las imágenes satelitales, comprendidas para el año 2000, 2010 y 2021.

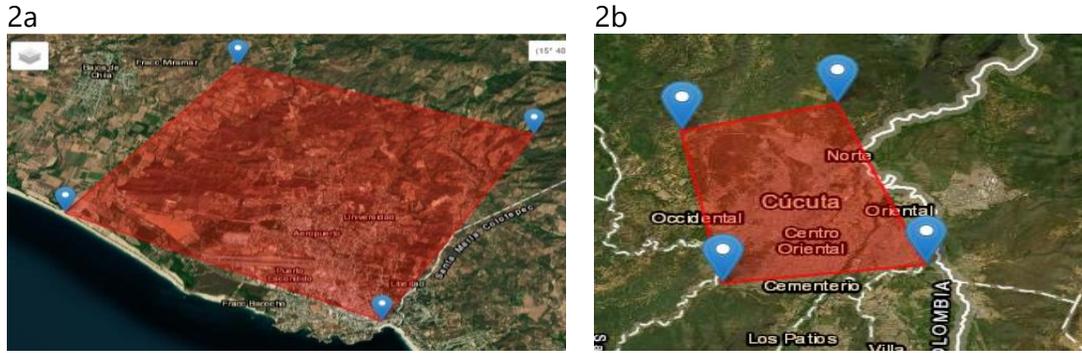


Figura 2. a) Polígono de San Pedro Mixtepec, México; b) Polígono de San José de Cúcuta, Colombia. Fuente: Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), 2022.

Criterios de selección

Los criterios de selección fueron preferentemente imágenes del satélite Landsat, porcentaje de nubosidad menor al quince por ciento (15 %) para la imagen del sitio de interés, se utilizó el satélite Landsat 8, ya que presenta resoluciones espaciales que llegan a los 15 m por píxel. Para la selección de fotografía del año 2021, se utilizó el satélite Landsat colección 1, nivel 1, el Landsat 8 OLI/TIRS C1 nivel 1 y para las imágenes restantes, comprendidas para el año 2000 y 2010 se utilizó el satélite Landsat 5.

Descarga de imágenes de satélite

Una vez definida el área de San Pedro Mixtepec, se descargaron cada de una de las imágenes de satélite, las cuales corresponden a las fechas de 28 de febrero de 2000, 23 de febrero de 2010 y 21 de febrero de 2021. Es necesario precisar, que se eligió durante el mes de febrero debido a la menor concentración de nubes, por ende, el periodo de selección fue desde el 1 al 28 de febrero según el año de interés. La imagen con fecha de 21 de febrero de 2021 (Figura 3a), denotó una buena luminosidad, sin presencia de nubes, lo cual permitió obtener las mejores condiciones para estudiar el área de interés. Una vez delimitada el área de Cúcuta, se realizó la descarga de cada de una de las imágenes de satélite, con las fechas de 15 de agosto y 18 de octubre para el año 2000, 11 de junio de 2011 y 7 de diciembre de 2021 (Figura 3b).

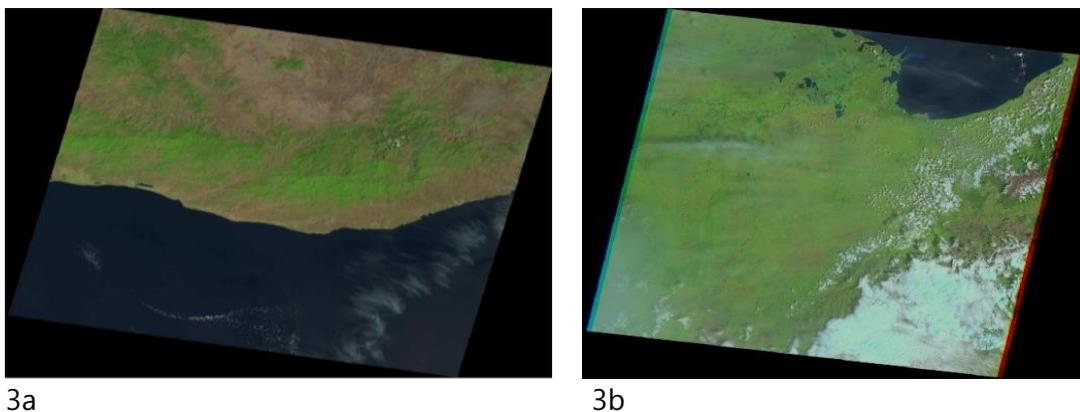


Figura 3. a) Fotografía tomada con el satélite LANDAT-8, durante el 21 de febrero de 2021; b) Fotografía tomada con el LANDAT-5, a las 14:43 del 18 de octubre de 2000. Fuente: Sistema del Servicio Geológico de los Estados Unidos. USGS, 2000

Pre-procesamiento digital de las imágenes de satélite

Se aplicó el proceso de unión de imágenes de satélite, unión de bandas, así como el enmascaramiento de nubes, para poder visualizar las cubiertas de vegetación, infraestructura y cuerpos de agua.

Digitalización

La digitalización de los mapas de cubiertas de las zonas de estudio, se realizaron a través de la pantalla digital de ArcGis, con la licencia proporcionada por la Universidad Autónoma Chapingo.

Procesamiento de la información

Al momento de diagnosticar la cobertura vegetal para ambas ciudades, se ejecutaron etapas relativas a la interpretación visual y de procesamiento mediante el uso del mapa base, se construyó una leyenda apropiada a las diferentes coberturas, a través del ArcGis, y, el material empleado se asoció a coordenadas UTM, WG8-84, Zona 14 Norte. Para poder visualizar las diferentes cubiertas, se realizaron una serie de combinaciones de bandas (Tabla 2), principalmente para el reconocimiento de la vegetación se utilizó el falso color, para el caso de las imágenes de satélite que fueron descargadas con el satélite Landsat 5, se utilizó la combinación de bandas 5,4 y 3, y para las imágenes del satélite Landsat 8, se combinaron las bandas, 6,5 y 3.

Tabla 2. Combinación de bandas sugeridas.

Característica	Banda
Color natural	B_432
Falso color (zonas urbanas)	B_764
Falso color (vegetación)	B_543 o B_653
Agricultura	B_652
Vegetación saludable	B_56

2. Resultados

Proceso de identificación visual de cubiertas

En un primer momento, las cubiertas se interpretaron de manera visual (Falso color-vegetación) de cubiertas del año 2000 (Figura 4) y cubiertas del año 2010 (Figura 5), para el municipio de San Pedro Mixtepec, México.



Figura 4. Cubiertas del año 2000 de San Pedro Mixtepec, México.

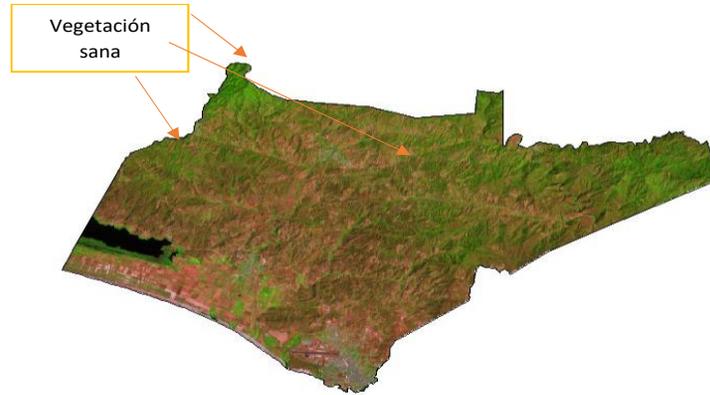


Figura 5. Cubierta del año 2010 de San Pedro Mixtepec con la combinación de falso color (B_543). Fuente: García, 2022.

Al aplicar la combinación de bandas sugeridas para el caso de las zonas urbanas, se puede apreciar que, para el año 2021 San Pedro Mixtepec presenta un incremento significativo en la mancha urbana a comparación del año 2000 y 2010 (Figura 6).

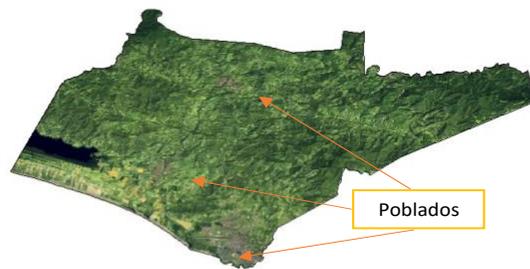


Figura 6. Cubierta del año 2021 de San Pedro Mixtepec con la combinación para detectar zonas urbanas (B_764).

Para diagnosticar el tipo de vegetación y la pérdida de cobertura, se utilizó como base el Conjunto de datos vectoriales relativo a los tipos de vegetación, con serie VII, para el caso de México, con escala 1:250 000, el cual fue descargado del Portal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2022). En función de lo anterior, para el año 1980, San Pedro Mixtepec presentaba una superficie de 17,924 ha de bosque seco tropical (Figura 8), entonces, una vez realizado el reconocimiento de las diferentes cubiertas, se procedió a ejecutar la clasificación supervisada de los años 2000, 2010 y 2010 para San Pedro Mixtepec, México (Figuras 8, 9 y 10).

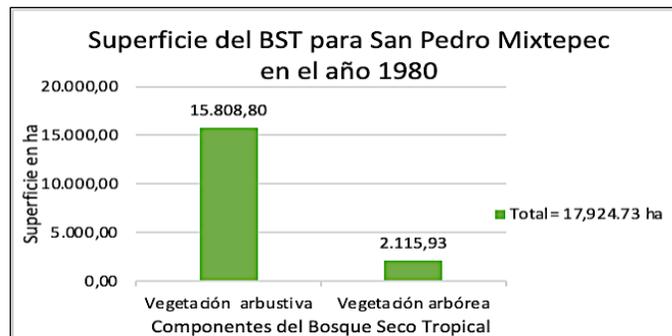


Figura 7. Superficie del BST para San Pedro Mixtepec, año 1980.

Se optó por el método de clasificación supervisada, ya que permite la ubicación de áreas de interés, con base a una imagen de satélite, es decir, se conoce inicialmente la cubierta en estudio, por lo tanto, permite la estimación cuantitativa. Para el caso de San Pedro Mixtepec, se tomó áreas bases del año 1980 (Figura 7), la cual indicaba una superficie total de 17,924.73 ha de componentes del Bosque seco tropical, las cuales sirvieron de sustento para la generación de cuatro (4) tipos de coberturas, la primera hace referencia a la vegetación, una segunda a los cuerpos de agua, una tercera clase relacionado con la infraestructura (viviendas, carreteras) y una cuarta clase relativo a las áreas desprovistas de vegetación alguna.

Se identificaron como clases de uso del suelo: cobertura vegetal, cuerpos de agua, infraestructura y parcelas agrícolas.

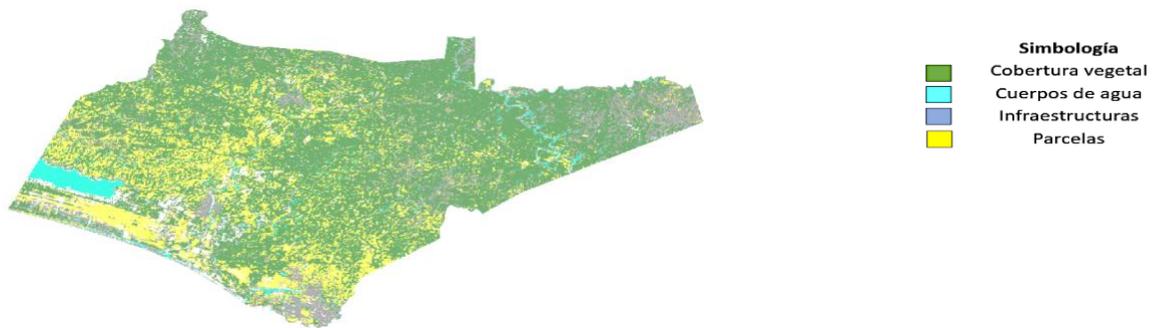


Figura 8. Clasificación supervisada año 2000 de San Pedro Mixtepec.

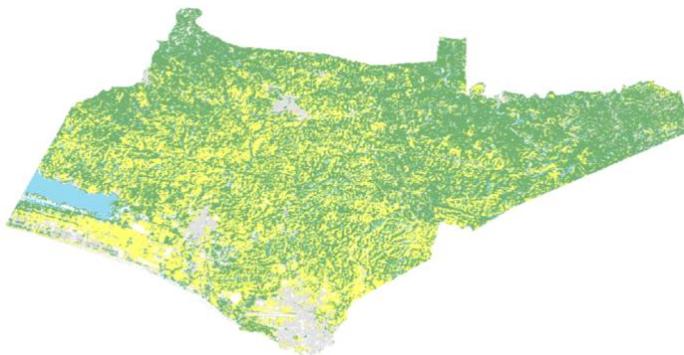


Figura 9. Clasificación supervisada año 2010 San Pedro Mixtepec

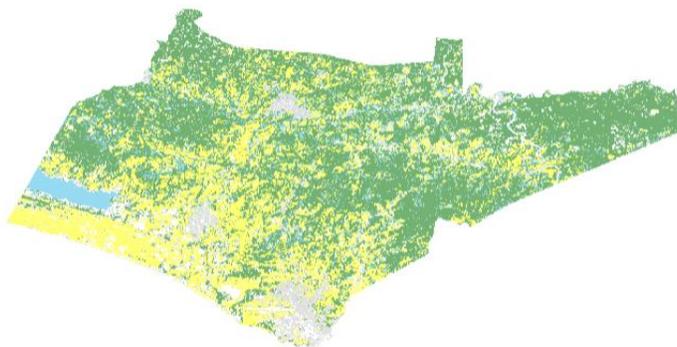


Figura 10. Clasificación supervisada año 2021 San Pedro Mixtepec

Para realizar el estudio en la zona de Cúcuta, se utilizó el proceso de unión de imágenes satelitales, de tal forma que permite, cubrir toda el área del municipio, y de igual manera, se efectuó el proceso de identificación visual (color natural) de cubiertas del año 2000, 2010 y 2021 (Figura 11)

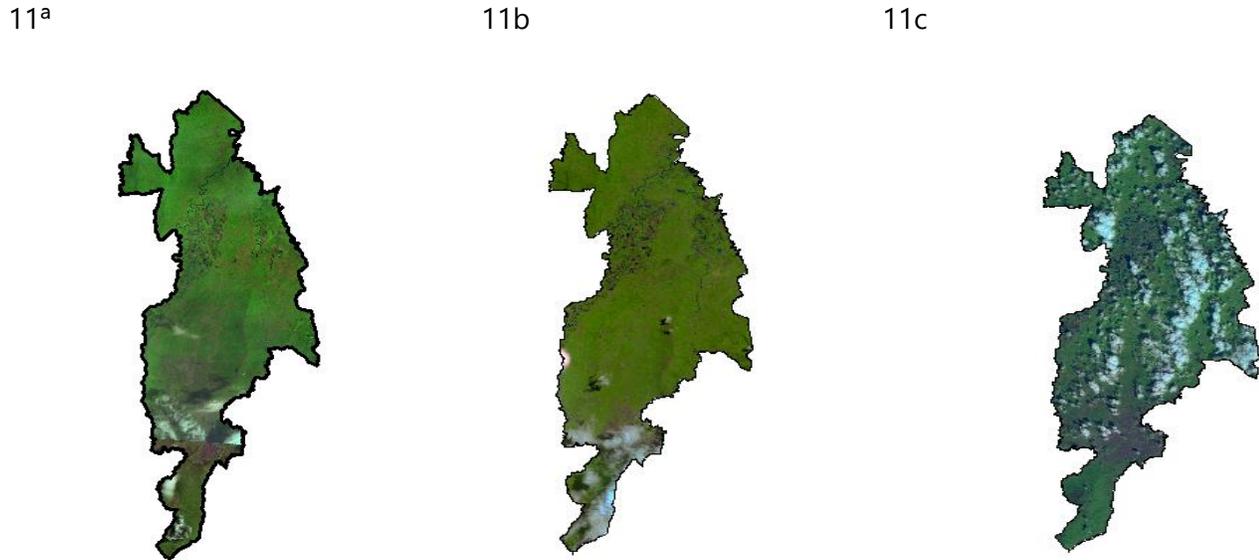


Figura 11. a) San José de Cúcuta, Colombia para el año 2000; b) San José de Cúcuta, Colombia para el año 2010; c) San José de Cúcuta, Colombia para el año 2021.

Para detectar las cubiertas se utilizó como referencia la capa shapefile (shp) del cambio cobertura de bosque del periodo 1990-2000 del monitoreo y seguimiento de bosque, extraído del Geoportal del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), posteriormente, se ejecutó una clasificación supervisada (Figura 12) con el clasificador MAXLIKE (máxima verosimilitud) y se identificaron la cobertura vegetal, poblados y las áreas agrícolas.

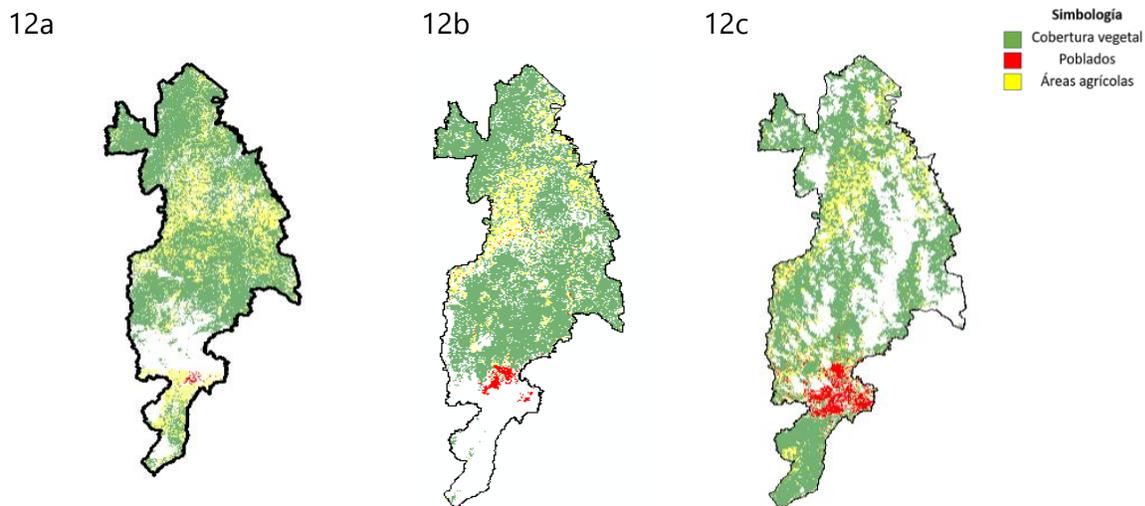


Figura 12. a) Clasificación supervisada del año 2000 por Maximum likelihood de Cúcuta, Colombia; b) Clasificación supervisada del año 2010 por Maximum likelihood de Cúcuta, Colombia; c) Clasificación supervisada del año 2021 por Maximum likelihood de Cúcuta, Colombia.

Cálculo de los cambios de cobertura

Posteriormente, se realizó el cálculo de la tasa de cambio en la superficie de cobertura vegetal, efectuado en la hoja de cálculo Excel, 2022 (Tabla 3).

Tabla 3. Superficie de Bosque seco tropical del año 2000 a 2021.*bs-t: Bosque seco tropical.

Año	San Pedro Mixtepec México	Infraestructura	San José de Cúcuta	Infraestructura
	(bs-t)		Colombia (bs-t)	
2000	12,553ha	17,655 ha	81,622 ha	260 ha
2010	11,766 ha	17,721 ha	79,518 ha	1,481 ha
2021	12,190 ha	16,568 ha	55,693 ha	3,831 ha

Fórmula de la tasa de cambio propuesta por la FAO

La tasa de cambio es un indicador de magnitud y velocidad, el cual permite la obtención de elementos cuantitativos necesarios para conocer la dinámica y comportamiento del cambio en superficies forestales o en cualquier uso de suelo (Ochoa et al., 2022).

Las diferentes tasas de cambio se determinaron con la fórmula que propone la FAO (2005), para cualquier tipo de cobertura en relación con una superficie inicial con una final con respecto al tiempo:

$$T_c = \left[\left(\frac{C_2}{C_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \times 100 \quad (1)$$

En donde T_c es el porcentaje de tasa de cambio, C_1 la cobertura en una fecha inicial, C_2 la cobertura en una fecha final, y n es la diferencia de años entre la cobertura inicial y final

3. Análisis de resultados

Las últimas evaluaciones mundiales de los recursos forestales muestran que existe una disminución en las tasas de deforestación (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2010, 2015). Particularmente, el bosque seco tropical (BTS) ha sido el ecosistema más vulnerable ante la expansión de la agricultura, tanto intensiva como de autoconsumo, la presión que se ejerce sobre los BS-T provoca transformaciones que llevan a la fragmentación, la degradación y la deforestación (Guerra-Martínez et al., 2021).

Análisis entre periodos para ambos municipios

San Pedro Mixtepec, México para el periodo de 2000 al 2010

De la superficie total del municipio que es de 32,624 ha, para el año 2000 el Bosque seco tropical representa un superficie del 38%, sin embargo, para el año 2010, presentó una disminución de su superficie alrededor

del 6.2 %. Se presentó una tasa de cambio para este periodo del -0.64%, lo que significa que la vegetación que, durante esos años, ha ocurrido una degradación.

Periodo de 2010 al 2021

Este periodo presenta una tasa de cambio positiva del 0.35%, lo que refleja, en función de los diferentes esfuerzos que ha realizado la Regiduría de Ecología, mediante la implementación de una serie de medidas de mitigación, dentro de las que destacan es que por cada árbol derribado se establecen veinte (20), y como antecedentes se tiene que, en 2018 se realizaron trabajos de reforestación entre el gobierno local y la Universidad del Mar (UMAR) quien a través de sus especialistas de la carrera de Ingeniería Forestal, ejecutaron una reforestación en tres (3) momentos, la cual se centró en una concientización a la sociedad sobre el deterioro ambiental, después en un diagnóstico sobre las condiciones viables para calcular la densidad de plantación de las especies a establecer y finalmente, los trabajos de reforestación.

Por ende, no es casualidad de que San Pedro Mixtepec, a comparación del periodo 2010 a 2021 haya aumentado su cobertura vegetal, sino que pone de manifiesto el resultado de trabajo generado a través de las alianzas en favor del medio ambiente.

San José de Cúcuta, Colombia, para el periodo 2000 al 2010

De acuerdo con lo establecido en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Cúcuta (Concejo Municipal de Cúcuta, 2001), el bosque seco tropical cubre un 18,33% del total del territorio municipal, la mayor parte de esta zona de vida se establece en el Cerro Tasajero; sin embargo y pese a ser un ecosistema frágil, éste se encuentra fragmentado por ramales internos que atraviesan zonas de producción agrícola, ganadera y minera, además de vías internas que comunican la ciudad con las repetidoras de radio y televisión establecidas en la cima del cerro (Carrillo-Fajardo et al. 2017).

El Plan de Ordenamiento Territorial Cúcuta 2017 (Municipio de San José de Cúcuta., 2017) posee una superficie de 113, 402 ha, de las cuales un 6% corresponde a territorios artificializados (urbanos, aeropuerto, zonas de extracción minera), y alrededor de un 53%, pertenece a tierras agrícolas y en función de los datos obtenidos para el periodo 2010, la superficie forestal disminuyó al pasar de 81,622 ha a 79, 518 ha de vocación forestal, sin embargo, en este intervalo la superficie de tierras agrícolas mantiene una extensión de 14,990 ha para el año 2010. Para este periodo se presenta una tasa de cambio negativa con -0.26%.

Periodo de 2010 al 2021

Para San José de Cúcuta, presenta una superficie estimada de 55,693 hectáreas y una tasa de cambio de -3.49%. Los datos obtenidos para el año 2021 coinciden con los señalados en el Plan de Desarrollo Cúcuta 2020-2023, en el que se hace mención, que la cobertura vegetal cubre un 44% (Alcaldía de San José de Cúcuta, 2020).

La SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales., 2013) alude que el crecimiento demográfico a través del aprovechamiento desmedido de los recursos naturales, y, sin un manejo sostenible, provoca como consecuencia final, el deterioro del paisaje.

En un trabajo de tesis denominado “Dinámica del uso de suelo en el Municipio de San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca, en el periodo 1980—2010”, (Contreras José, 2012), calculó una tasa de -1.05% y una pérdida anual de superficie forestal de 220 ha, por su parte Cúcuta ha tenido una tendencia de crecimiento y expansión urbana marcada por la ocupación informal y por la expansión de la ciudad formal (Estévez Martha & Castañeda Gabriel, 2012).

Conclusiones

Tomando en consideración la superficie vegetal desde el año 1980 en comparación con el año 2021, se plantea para el municipio de San Pedro Mixtepec, una serie de Programas de Recuperación a corto, mediano y largo plazo, con un objetivo de reforestación de aproximadamente 5,734 hectáreas. Por las características climáticas y topográficas del municipio, estudios recientes han demostrado que debido al abandono de las actividades agrícolas que afectan a la región, algunos atributos del BTS, como la cobertura, han presentado una tendencia hacia la recuperación en los últimos 20 años (Guerra-Martínez et al., 2019). La expansión y densificación de la cobertura de bosques secundarios es de gran importancia para el desarrollo de suelo, la recarga de mantos acuíferos y el restablecimiento de la fauna nativa, lo que justifica el interés por recuperar la cobertura inicial del bosque seco tropical (Lomelí-Jiménez et al., 2017).

Los datos obtenidos para el municipio de San José de Cúcuta para el año 2021, indican que la superficie de bosque seco tropical es de 55,693 ha, por ende, refleja el daño causado a los servicios ecosistémicos, como la regulación del clima y captura de carbono, principalmente, es decir, por su contribución a contrarrestar los efectos climáticos, por la tanto de acuerdo con la Evaluación del Ecosistema del Milenio (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), ambos municipios al ocurrir la destrucción de hábitats naturales, representa la más severa y extendida amenaza a la biodiversidad global.

Un suceso alentador, es que Colombia, en la última década el conocimiento de la vegetación presente en los bosques secos tropicales ha mejorado en aspectos de composición, estructura, distribución, biogeografía y ecología (Mercado Gómez et al., 2023). Por tal motivo, una de las alternativas que se plantean a nivel internacional para la implementación de reforestaciones masivas es la de “bombardear” las áreas deforestadas con “bombas de semillas”, las cuales inician en Japón con Masanabu Fukuoka.

La presente investigación marca un antecedente importante y punto de partida de posteriores investigaciones, ya que, en todas las interpretaciones y los procesos de mapeo, el uso de observaciones de campo es esencial para adquirir conocimientos de la situación local y recopilar información para áreas que no pueden ser cartografiadas desde las imágenes y con ello, verificar el resultado de la interpretación (Bakker et al., 2009).

Los estudios sobre el cambio de uso de suelo deben de abordarse desde una perspectiva de múltiples escalas espaciales y temporales debido a que la estructura, las funciones y los procesos del ecosistema que inciden sobre la recuperación de los bosques actúan a distintas escalas (Arroyo-Rodríguez et al., 2017a; Gunderson, 2000; Sheil, Nasi y Johnson, 2004). Por ende, evaluar un territorio a partir del empleo de diversas resoluciones espaciales y temporales (Arroyo-Rodríguez, et al., 2017b) mostrará, desde distintas perspectivas, las causas

biofísicas y socioeconómicas que explican la recuperación, y permitirá tomar decisiones más integradoras sobre los recursos naturales.

Finalmente, para conservar, preservar nuestros bosques y hacer frente al cambio climático a escala local, se requiere pasión, recursos, determinación y acción climática de los diferentes actores involucrados (gobierno-academia- empresarios y ciudadanos).

Contribución por autor

Los autores contribuyeron en la recopilación de la información, análisis y elaboración del documento.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia, por el acervo bibliográfico disponible y a la Universidad Autónoma Chapingo, por el otorgamiento de las licencia del programa ArcGis.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- [1]. Arroyo-Rodríguez, V., Melo, F. P. L., Martínez-Ramos, M., Bongers, F., Chazdon, R. L., Meave, J. A., Norden, N., Santos, B. A., Leal, I. R., & Tabarelli, M. (2017a). Multiple successional pathways in human-modified tropical landscapes: new insights from forest succession, forest fragmentation and landscape ecology research. *Biological Reviews*, 92(1), 326–340. doi: 10.1111/brv.12231
- [2]. Arroyo-Rodríguez, V., Moreno, C. E., & Galán-Acedo, C. (2017b). La ecología del paisaje en México: Logros, desafíos y oportunidades en las ciencias biológicas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 42– 51. doi: 10.1016/j.rmb.2017.10.004
- [3]. Alcaldía de San José de Cúcuta. (2020). Plan de Desarrollo Municipal Cúcuta 2020-2023.
- [4]. Bakker, W. H., Feringa, W., Gieske, A. S. M., Gorte, B. G. H., Grabmaier, K. A., Hecker, C. A., Horn, J. A., Huurneman, G. C., Janssen, L. L. F., Kerle, N., Meer, F. D., Parodi, G. N., Pohl, C., Reeves, C. V., Ruitenbeek, F. J. V., Schetselaar, E. M., Tempfli, K., Weir, M. J. C., Westinga, E., & Woldai, T. (2009). Principles of remote sensing: an introductory textbook. (K. Tempfli, N. Kerle, G. C. Huurneman, & L. L. F. Janssen, Eds.). Enschede, The Netherlands: ITC Educational Textbook Series.
- [5]. Bocco Gerardo, Mendoza Manuel, & Masera R. Omar. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación.
- [6]. Castillo-Santiago MA. 2009. Análisis con imágenes satelitales de los recursos forestales en el trópico húmedo de Chiapas: un estudio de caso en Marqués de Comillas PhD. Thesis, El Colegio de la Frontera Sur.
- [7]. Carrillo-Fajardo, M., Rivera-Díaz, O., & Sánchez-Montaña, R. (2017). Caracterización florística y estructural del bosque seco tropical del Cerro Tasajero, San José de Cúcuta (Norte de Santander), Colombia. *Actualidades Biológicas*, 29(86), 55–73. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.329348>.

- [8]. Ceballos Gerardo, Creel-Bezaury Juan E., & Espinoza Eduardo. (2010). Diversidad, Amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las Selvas Secas del Pacífico de México.
- [9]. CEPAL [Comisión Económica para América Latina y el Caribe]. 2021. La pérdida de los bosques de América Latina y el Caribe 1990-2020: evidencia estadística. Temas estadísticos de la CEPAL, 2. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47151/1/S2100266_es.pdf (accessed March 14th, 2022).
- [10]. Chazdon, R. L. (2014). Second Growth: the promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation. Yokohama, Japan: University of Chicago Press. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=buJcngEACAAJ>
- [11]. Contreras José (2012). Dinámica del uso del suelo en el Municipio de San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca, en el periodo 1990-2010. (Tesis de licenciatura). Universidad del Mar.
- [12]. Derroire, G., Balvanera, P., Castellanos-Castro, C., Decocq, G., Kennard, D. K., Lebrija-Trejos, E., Leiva, J. A., Odén, P. C., Powers, J. S., Rico-Gray, V., Tigabu, M., & Healey, J. R. (2016). Resilience of tropical dry forests – a meta-analysis of changes in species diversity and composition during secondary succession. *Oikos*, 125(10), 1386–1397. <https://doi.org/10.1111/oik.03229>
- [13]. De Keersmaecker, W., Lhermitte, S., Tits, L., Honnay, O., Somers, B., & Coppin, P. (2015). A model quantifying global vegetation resistance and resilience to short-term climate anomalies and their relationship with vegetation cover. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 539–548. doi: 10.1111/geb.12279.
- [14]. Dupuy, J. M. J., Hernández-Stefanoni, J. L., Hernández-Juárez, R. A., Tetetla-Rangel, E., López-Martínez, J. O., Leyequién-Abarca, E., Tun-Dzul, F. J., & May-Pat, F. (2012). Patterns and correlates of tropical dry forest structure and composition in a highly replicated chronosequence in Yucatan, Mexico. *Biotropica*, 44(2), 1–12. doi: 10.1111/j.1744-7429.2011.00783.x
- [15]. Estévez Martha, & Castañeda Gabriel. (2012). Cambios en la estructura urbana de Cúcuta: impacto generado por el Plan de Ordenamiento territorial en la transformación de la ciudad.
- [16]. FAO. 2021. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 - Informe principal. Roma, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/documents/card/es/c/ca9825es>
- [17]. Flores, R., Delgado, L. A., & Rico-Gray, Y. V. (2018). La resiliencia del bosque seco tropical: un seguro de vida para su conservación.
- [18]. Galicia, L., Zarco-Arista, A. E., Mendoza-Robles, K. I., Palacio-Prieto, J. L., & García-Romero, A. (2008). Land use/cover, landforms and fragmentation patterns in a tropical dry forest in the southern Pacific region of Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 29, 137–154. doi: 10.1111/j.1467-9493.2008.00326.x
- [19]. Galindo, Espejo O, Rubiano J.C, Vergara L.K., & Cabrera E. (2014). Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia.: Vol. V. 2.0. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. . <http://www.scripto.com.co>

- [20]. Gentry, H. S. (1942). Rio Mayo plant a study of the flora and vegetation of the valley of the Valley of The Rio Mayo, Sonora.
- [21]. Guerra- Martínez, F., García-Romero, A., Cruz- Mendoza, A. y Osorio-Olvera, L. (2019). Regional Analysis of indirect factors affecting the recovery, degradation and deforestation in the tropical dry forests of Oaxaca, México. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 40, 387-409. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12281>.
- [22]. Guerra-Martínez, F., García-Romero, A., & Martínez-Morales, M. A. (2020). Assessment of the ecological resilience of tropical dry forests: A multi-scalar approach. *Madera y Bosques*, 26(3), 1–19. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2631983>
- [23]. Guerra-Martínez, F., García-Romero, A., Martínez-Morales, M. Á., & López-García, J. (2021). Ecological resilience of the tropical dry forest: Recovery of the structure, composition and diversity in Tehuantepec, Oaxaca. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2021.92.3422>
- [24]. Gunderson, L. H. (2000). Ecological resilience—In theory and application. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31(1), 425–439. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.31.1.425
- [25]. Hecht, S. B., Kandel, S., Gomes, I., Cuellar, N., & Rosa, H. (2006). Globalization, forest resurgence, and environmental politics in El Salvador. *World Development*, 34(2), 308–323. doi: 10.1016/j.worlddev.2005.09.005
- [26]. Hirota, M., Holmgren, M., Van Nes, E. H., & Scheffer, M. (2011). Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions. *Science*, 334(6053), 232–235. doi: 10.1126/science.1210657
- [27]. Hodgson, D., McDonald, J. L., & Hosken, D. J. (2015). What do you mean, “resilient”? *Trends in Ecology and Evolution*, 30(9), 503–506. doi: 10.1016/j.tree.2015.06.010
- [28]. IDEAM. (2022). Características climáticas del Norte de Santander. Precipitación. <http://www.ideam.gov.co/AtlasWeb/info/Textos/Departamentos/memoNORTESANTANDER.pdf>
- [29]. IPBES [Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services]. 2018. The IPBES assessment report on land degradation and restoration. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3237392>.
- [30]. Janzen, D. H. (1988). Tropical dry forests. In *Biodiversity* (pp. 130–137). Washington, DC: National Academy Press.
- [31]. Leija-Loredo, E. G., Reyes-Hernández, H., Reyes-Pérez, O., Flores-Flores, J. L., & Sahagún-Sánchez, F. J. (2000). Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del estado de Oaxaca, México (Vol. 22).
- [32]. Lloret, F., Keeling, E. G., & Sala, A. (2011). Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos*, 120(12), 1909–1920. doi: 10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x
- [33]. Li, Y. (2012). Urban- rural interaction patterns and dynamic land use: implications for urban-rural integration in China. *Regional Environmental Change*, 12 (4), 803-812. <https://doi.org/10.1007/s10113-012-0295-4>.

- [34]. Lomelí-Jimenez, A. J., Pérez-Salicrup, D.R., Figueroa- Rangel, B. L., Mendoza-Cantú, M. E., Cuevas-Guzmán, R., Andresen, E. et al. (2017). Are changes in remotely sensed canopy over associated to changes in vegetation structure, diversity, and composition in recovered tropical shrublands? *Plant ecology*, 218, 1021-1033. <https://doi.org/10.1007/s11258-017-0750-x>.
- [35]. Maass, J. M. (1995). Conversion of tropical dry forest to pasture and agriculture. In S. H. Bullock, H. A. Mooney, & E. Medina (Eds.), *Seasonally Dry Tropical Forests* (pp. 399–422). Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511753398.017
- [36]. Mercado Gómez, J., Arroyo Martínez, J. D., & Álvarez Pérez, P. J. (2023). Diversidad y distribución espacial de epifitas vasculares en fragmentos de bosque seco tropical del Caribe colombiano. *Colombia Forestal*, 26(1). <https://doi.org/10.14483/2256201x.19375>
- [37]. Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press.
- [38]. Miles, L., Newton, A. C., DeFries, R. S., Ravilious, C., May, I., Blyth, S., Kapos, V., & Gordon, J. E. (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography*, 33(3), 491–505. doi: 10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x
- [39]. Municipio de San José de Cúcuta. (2017). *Proceso de revisión ordinaria del Plan de Ordenamiento territorial (POT)*. Municipio de San José de Cúcuta.
- [40]. Municipio de San José de Cúcuta. (2001). *Proceso de revisión ordinaria del Plan de Ordenamiento territorial (POT)*. Municipio de San José de Cúcuta. <https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/123456789/12525>
- [41]. Murphy, P. G., & Lugo, A. E. (1986). Ecology of tropical dry forest. *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 17, 67–88. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.000435>
- [42]. Mooney, H. A. (2011). Synthesis and promising lines of research on seasonally dry tropical forests. In R. Dirzo, H. S. Young, H. A. Mooney, & G. Ceballos (Eds.), *Seasonally dry tropical forests: ecology and conservation* (pp. 301–306). Washington, USA: Island Press/Center for Resource Economics. doi: 10.5822/978-1- 61091-021-7_17.
- [43]. Ochoa, S. A. H., Navarro-Martínez, A., Ellis, E. A., & Gómez, I. U. H. (2022). Deforestation in the municipality of Bacalar, Quintana Roo, Mexico during the period 1993-2017. *Madera y Bosques*, 28(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2832396>
- [44]. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, International Union of Soil Sciences, & International Soil Reference and Information Centre. (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo : un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional*.
- [45]. Queiroz C, Beilin R, Folke C, Lindborg R. 2014. Farmland abandonment: Threat or opportunity for biodiversity conservation? *Frontiers in Ecology and the Environment* 12: 288-296. DOI: <https://doi.org/10.1890/120348>.

- [46]. Rozendaal DMA, Bongers F, Aide TM, Alvarez-Dávila E, Ascarrunz N, Balvanera P, Becknell JM, Bentos TV, Brancalion, PHS, Cabral GAL, Calvo-Rodriguez S, Chave J, César RG, Chazdon RL, Condit R, Dallinga JS, de Almeida-Cortez JS, de Jong B, de Oliveira A, ..., Poorter L. 2019. Biodiversity recovery of Neotropical secondary forests. *Science Advances* 5. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau3114>
- [47]. Rykiel, J. E. J. (1985). Towards a definition of ecological disturbance. *Australian Journal of Ecology*, 10, 361–365. doi: 10.1111/j.1442- 9993.1985.tb00897.x
- [48]. Romero-Padilla, A., & Martín Hernández-Juárez, Y. (2022). Cambio de uso de suelo por la construcción del NAICM en Texcoco, Estado de México Land use change by the NAICM construction in Texcoco, Mexico State. <https://doi.org/10.28940/terra>
- [49]. Rzedowski, J., 2006. *Vegetación de México*. 1ra Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- [50]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Informe de la situación del medio ambiente en México: compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental.
- [51]. Sheil, D., Nasi, R., & Johnson, B. (2004). Ecological criteria and indicators for tropical forest landscapes: Challenges in the search for progress. *Ecology and Society*, 9(2), 7–12. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10568/18918>
- [52]. Scheffer, M., Carpenter, S. R., Dakos, V., & van Nes, E. H. (2015). Generic indicators of ecological resilience: inferring the chance of a critical transition. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 46(1), 145–167. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-112414- 054242
- [53]. Wright, S. J., & Muller-Landau, H. C. (2006). The future of tropical forest species. *Biotropica*, 38(3), 287–301. doi: 10.1111/j.1744- 7429.2006.00154.x