



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS TABASCO

POSGRADO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS EN EL TRÓPICO

EFFECTO DEL CAMBIO DEL USO AGRÍCOLA EN LA CALIDAD DE LOS SUELOS EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS, TABASCO, MÉXICO

M.C. ALEX RICARDO RAMÍREZ GARCÍA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO

2023

La presente tesis, titulada "EFECTO DEL CAMBIO DEL USO AGRÍCOLA EN LA CALIDAD DE LOS SUELOS EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS, TABASCO, MÉXICO", realizado por el alumno: ALEX RICARDO RAMÍREZ GARCÍA, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
CIENCIAS AGRÍCOLAS EN EL TRÓPICO

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: _____
DR. JOEL ZAVALA CRUZ

ASESOR: _____
DR. ARMANDO GUERREO PEÑA

ASESOR: _____
DR. JOAQUÍN ALBERTO RINCÓN RAMÍREZ

ASESOR: _____
DRA. EUSTOLIA GARCÍA LÓPEZ

ASESOR: _____
DR. RUFO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO, ENERO DEL 2023

EFFECTO DEL CAMBIO DE USO AGRÍCOLA EN LA CALIDAD DE LOS SUELOS EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS, TABASCO, MÉXICO

**M.C. Alex Ricardo Ramírez García,
Colegio de Postgraduados Campus, Tabasco, 2023**

RESUMEN

El cambio de uso del suelo inducido por actividades humanas modifica la cobertura del planeta, implicando transformación del paisaje natural, pérdida de biodiversidad, pérdida de hábitat de la fauna silvestre, reducción de servicios ecosistémicos y degradación de suelos. El objetivo general de la investigación fue evaluar el cambio de vegetación natural a usos agrícolas y su efecto en la calidad del suelo en la región de Los Ríos (RR), Tabasco, México, en una superficie de 6234.2 km². La primera fase consistió en analizar el cambio de uso agropecuario y su efecto en la vegetación natural en el periodo 1947-2019, mediante fotointerpretación de fotografías aéreas de 1947, clasificación supervisada de imágenes satelitales de 1984-2019, y verificación de campo. Posteriormente se hizo una investigación retrospectiva–prospectiva, para establecer un índice de calidad de los suelos (ICS), con modelación utilizando la tecnología NIR y quimiometría, para la capa superficial (0-30 cm) de un Cambisol (CM) en 16 sitios con uso agropecuario. En seguida se evaluó la calidad del CM con usos de cultivo de temporal (CT), cultivo anual (CA), pastizal (Pa) y vegetación secundaria (VS), establecidos en 1984, 2000 y 2019, mediante análisis de varianza y comparación de medias de propiedades físicas y químicas. Finalmente, se evaluó la sustentabilidad de tres usos agropecuarios sobre el CM, con base en entrevistas a productores e indicadores de sustentabilidad de los componentes social, económico y ambiental. Las conclusiones fueron: 1) la vegetación natural fue sustituida por cultivos, pastizales, plantaciones forestales y asentamientos humanos; las áreas de selva, vegetación secundaria e hidrófita disminuyeron de 82.3 a 29.7 %, representando una pérdida de 64 % en la RR; la mayor pérdida de vegetación ocurrió entre 1947 y 1984; 2) con base en el índice de calidad de suelo (ICS) y la tecnología NIRS, se pudo predecir el 58 % de los

suelos de la RR degradados en su calidad, por efecto de los CT y CA, ya que el modelo utilizado cumple con los estadísticos y predice correctamente el ICS en el 100 % de los casos; 3) los altos contenidos de materia orgánica (MO) de los CM con VS en las tres fechas de evaluación (1984, 2000 y 2019), evidenciaron mayor calidad de suelo, en comparación con el CM con CT y CA en la región. La alta densidad aparente (DA) registrada en CM con Pa que datan 1984, indican demérito de la calidad del suelo por compactación, a consecuencia del pastoreo de la ganadería extensiva; y 4) los usos agropecuarios de la RR, por componentes social, económico y ecológico, presentaron indicadores de sustentabilidad: a) positivos en escolaridad, migración, empleo, superficie de producción, satisfacción de necesidades, productividad, índice de Shannon, índice de equidad de Pielou, nitrógeno y clase de tierra, y b) negativos en número de acciones para recuperar la producción ante eventos hidrometeorológicos, ingreso por productividad de los usos agropecuarios y acciones para la conservación de tierras.

Palabras clave: selva tropical; uso agropecuario, cultivos tropicales, degradación del suelo, materia orgánica, densidad aparente, índice de sustentabilidad

**EFFECT OF CHANGE OF AGRICULTURAL USE ON SOIL QUALITY IN THE
REGION OF LOS RÍOS, TABASCO, MEXICO**

**M.C. Alex Ricardo Ramírez García,
Colegio de Postgraduados Campus, Tabasco, 2023**

ABSTRACT

Land-use change is induced by human activities modifies the planet's cover, implying transformation of the natural landscape, loss of biodiversity, loss of habitat for wildlife, reduction of ecosystem services and soil degradation. The general objective of the research was to evaluate the change from natural vegetation to agricultural uses and its effect on soil quality in the Los Ríos (RR) region, Tabasco, Mexico, in an area of 6234.2 km². The first phase consisted of analyzing the change in agricultural use and its effect on natural vegetation in the period 1947-2019, through photo-interpretation of aerial photographs from 1947, supervised classification of satellite images from 1984-2019, and field verification. Subsequently, a retrospective-prospective investigation was carried out to establish a soil quality index (ICS), with modeling using NIR technology and chemometry, for the superficial layer (0-30 cm) of a Cambisol (CM) in 16 sites. with agricultural use. Next, the quality of the CM was evaluated with uses of rainfed cultivation (CT), annual cultivation (CA), pasture (Pa) and secondary vegetation (VS), established in 1984, 2000 and 2019, through analysis of variance and comparison of means of physical and chemical properties. Finally, the sustainability of three agricultural uses on the CM was evaluated, based on interviews with producers and sustainability indicators of the social, economic and environmental components. The conclusions were: 1) the natural vegetation was replaced by crops, pastures, forest plantations and human settlements; the areas of jungle, secondary and hydrophyte vegetation decreased from 82.3 to 29.7 %, representing a loss of 64 % in the RR; the greatest loss of vegetation occurred between 1947 and 1984; 2) based on the soil quality index (ICS) and the NIRS technology, it was possible to predict 58 % of the soils of the RR degraded in their quality, due to the effect of the TC and CA, since the model used meets with the statistics and correctly predicts the ICS in 100% of the cases; 3) the high organic matter (OM) contents

of the CM with VS on the three evaluation dates (1984, 2000 and 2019), showed higher soil quality, compared to the CM with TC and CA in the region. The high apparent density (DA) registered in CM with Pa dating from 1984, indicate demerit of soil quality due to compaction, as a consequence of extensive cattle grazing; and 4) the agricultural uses of RR, by social, economic and ecological components, presented sustainability indicators: a) positive in schooling, migration, employment, production area, satisfaction of needs, productivity, Shannon index, equity index de Pielou, nitrogen and land class, and b) negative in number of actions to recover production in the face of hydrometeorological events, income from productivity of agricultural uses and actions for land conservation.

Key words: rain forest; agricultural use, tropical crops, soil degradation, organic matter, bulk density, sustainability index

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca con numero de apoyo: 723053, otorgada durante mi formación en el programa de doctorado PRODOCAT, Campus Tabasco, COLPOS. Al Colegio de Posgraduados por brindarme la oportunidad de realizar un posgrado de calidad, en especial al Campus Tabasco por el apoyo durante el trabajo de campo y laboratorio. Al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas (LASPA) por el apoyo durante la realización de los análisis de laboratorio de las propiedades físicas y químicas de calidad de suelo.

Así mismo, mi más sincero agradecimiento a mi profesor consejero y director de tesis Dr. Joel Zavala Cruz por su paciencia, dedicación, apoyo y conocimientos compartidos durante mi formación académica. Agradezco a mi comité de asesores integrado por: Dra. Eustolia García López, Dr. Armando Guerrero Peña, Dr. Joaquín Alberto Rincón Ramírez, y Dr. Rufo Sánchez Hernández, por sus consejos y recomendaciones durante la investigación. Al M.C. Alberto Córdova Sánchez y al Ing. Edgar Shirma Torres, por su apoyo en el trabajo de campo. A los productores de la región de Los Ríos, por su apoyo mediante el acceso a sus propiedades para obtener las muestras de suelo, y la disponibilidad para realizar la entrevista para la evaluación de la sustentabilidad.

CONTENIDO

| | |
|---|------|
| RESUMEN | iii |
| ABSTRACT | v |
| AGRADECIMIENTOS | vii |
| LISTA DE CUADROS | xiii |
| LISTA DE FIGURAS | xv |
| INTRODUCCIÓN GENERAL | xv |
| CAPÍTULO I. CAMBIO DE USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN EN 1947-2019 EN LA REGIÓN LOS RÍOS, TABASCO, MÉXICO | 6 |
| 1.1 RESUMEN | 6 |
| 1.2 ABSTRACT | 6 |
| 1.3 INTRODUCCIÓN | 7 |
| 1.4 MATERIALES Y MÉTODOS | 8 |
| 1.4.1 Fuentes de datos para la cartografía de uso de suelo y vegetación | 9 |
| 1.4.2 Clasificación de fotografías aéreas e imágenes satelitales | 10 |
| 1.4.3 Análisis de cambio de uso de suelo y vegetación | 13 |
| 1.5 RESULTADOS | 13 |
| 1.5.1 Uso del suelo y vegetación en el periodo 1947-2019 | 13 |
| 1.5.2 Pérdidas, ganancias y persistencias de usos del suelo y vegetación | 15 |

| | |
|---|-----------|
| 1.5.3 Transición de cambio de uso del suelo y vegetación | 16 |
| 1.6 DISCUSIÓN | 19 |
| 1.7 CONCLUSIONES | 23 |
| CAPÍTULO II. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUELO CON MÉTODOS CONVENCIONALES, ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO CERCANO Y QUIMIOMETRÍA | 24 |
| 2.1 RESUMEN | 24 |
| 2.2 ABSTRACT | 24 |
| 2.3 INTRODUCCIÓN | 25 |
| 2.4 MATERIALES Y MÉTODOS..... | 27 |
| 2.4.1 Sitios de muestreo..... | 27 |
| 2.4.2 Muestreo de suelos | 28 |
| 2.4.3 Análisis de los suelos y obtención de espectros VIS-NIR-SWIR..... | 28 |
| 2.4.4 Clasificación del contenido de materia orgánica en los suelos | 29 |
| 2.4.5 Modelo de clasificación del índice de calidad de suelo mediante la tecnología NIR | 30 |
| 2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 30 |
| 2.5.1 Materia orgánica e Índice de calidad de los suelos de la RR de Tabasco | 31 |
| 2.5.2 Modelo de clasificación del índice de calidad de suelo mediante la tecnología NIRS y la quimiometría | 33 |
| 2.6 CONCLUSIONES | 37 |

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO III. CALIDAD DE UN CAMBISOL CON DIFERENTE TIEMPO DE USO AGROPECUARIO EN LA REGIÓN LOS RÍOS, TABASCO, MÉXICO | 39 |
| 3.1 RESUMEN | 39 |
| 3.1 ABSTRACT | 39 |
| 3.3 INTRODUCCIÓN | 40 |
| 3.4 MATERIALES Y MÉTODOS..... | 41 |
| 3.4.1 Área de estudio | 41 |
| 3.4.2 Selección de usos agropecuarios en Cambisoles | 42 |
| 3.4.3 Muestreo de suelos | 42 |
| 3.4.4 Análisis de laboratorio | 43 |
| 3.4.5 Análisis estadístico..... | 43 |
| 3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 44 |
| 3.5.1 Calidad del Cambisol entre usos agropecuarios con diferentes años de uso | 44 |
| 3.5.2 Calidad del Cambisol entre usos agropecuarios | 46 |
| 3.5.3 Calidad del Cambisol por tiempo de uso agropecuario | 47 |
| 3.6 CONCLUSIONES | 49 |
| CAPÍTULO IV. VALORACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE USOS AGROPECUARIOS EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS, TABASCO..... | 50 |
| 4.1 RESUMEN | 50 |
| 4.2 ABSTRACT | 51 |

| | |
|---|----|
| 4.3 INTRODUCCIÓN | 51 |
| 4.4 MATERIALES Y MÉTODOS | 53 |
| 4.4.1 Selección de indicadores de sustentabilidad..... | 53 |
| 4.4.2 Diseño de la entrevista a productores | 53 |
| 4.4.3 Selección de usos agropecuarios y aplicación de la entrevista..... | 54 |
| 4.4.4 Muestreo de diversidad de plantas en los sistemas agropecuarios | 54 |
| 4.4.5 Índices de diversidad de plantas | 54 |
| 4.4.6 Datos de calidad del suelo | 55 |
| 4.4.7 Organización de la información de las entrevistas | 55 |
| 4.4.8 Indicadores y niveles de valoración de la sustentabilidad | 55 |
| 4.4.9 Evaluación de la sustentabilidad por indicador | 58 |
| 4.4.10 Evaluación de la sustentabilidad por componente | 58 |
| 4.4.11 Índices de sustentabilidad general de los usos agropecuarios | 58 |
| 4.5 RESULTADOS | 59 |
| 4.5.1 Componente social de los usos agropecuarios | 59 |
| 4.5.2 Componente económico de los usos agropecuarios | 60 |
| 4.5.3 Componente ecológico de los usos agropecuarios | 60 |
| 4.5.4 Indicadores de sustentabilidad del componente social | 62 |
| 4.5.5 Indicadores de sustentabilidad del componente económico | 62 |
| 4.5.6 Indicadores de sustentabilidad del componente ecológico | 63 |

| | |
|---|-----------|
| 4.5.7 Índices de sustentabilidad por componente social, económico y ecológico | 64 |
| 4.5.8 Índice de sustentabilidad general de los usos agropecuarios | 65 |
| 4.6 DISCUSIÓN | 66 |
| 4.6.1 Usos del suelo agropecuarios | 66 |
| 4.6.2 Indicadores de sustentabilidad | 68 |
| 1.7 CONCLUSIONES | 71 |
| CONCLUSIONES GENERALES | 72 |
| LITERATURA CITADA..... | 74 |
| ANEXOS | 96 |

LISTA DE CUADROS

CAPÍTULO I

| | | |
|--------------------|---|----|
| Cuadro 1.1. | Características de las imágenes satelitales utilizadas en el análisis de cambio de uso de suelo de la región de Los Ríos, Tabasco, México..... | 9 |
| Cuadro 1.2. | Usos del suelo y tipos de vegetación de la región de Los Ríos, Tabasco, México..... | 10 |
| Cuadro 1.3. | Superficies de usos del suelo y tipos de vegetación en el periodo 1947-2019 en la región de Los Ríos, Tabasco, México..... | 13 |
| Cuadro 1.4. | Perdidas, ganancias, cambio neto y persistencias (km ²) de usos de suelo y vegetación (USyV) en la región de Los Ríos, Tabasco, México..... | 16 |

CAPÍTULO II

| | | |
|--------------------|--|----|
| Cuadro 2.1. | Muestras clasificadas con el índice de calidad de suelo y la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002)..... | 31 |
| Cuadro 2.2. | Resultados de las métricas para evaluar la calidad de las predicciones del PLS-DA con el ICS..... | 34 |

CAPÍTULO III

| | | |
|--------------------|--|----|
| Cuadro 3.1. | Valores medios de los indicadores de calidad del CM entre usos del suelo con diferentes tiempos de establecimiento (años de uso) en la RR..... | 43 |
| Cuadro 3.2. | Valores medios de los indicadores de calidad del CM entre usos del suelo en la RR..... | 45 |
| Cuadro 3.3. | Valores medios de los indicadores de calidad del CM agrupando usos del suelo por año (tiempo de uso) en la RR..... | 46 |

CAPÍTULO IV

| | | |
|--------------------|---|----|
| Cuadro 4.1. | Indicadores y niveles de valoración de la sustentabilidad del componente social en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco..... | 54 |
| Cuadro 4.2. | Indicadores y niveles de valoración de la sustentabilidad del componente económico en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco..... | 55 |
| Cuadro 4.3. | Indicadores y niveles de valoración de la sustentabilidad del componente ecológico en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco..... | 55 |
| Cuadro 4.4. | Fórmulas empleadas para calcular el Índice General de Sustentabilidad..... | 57 |
| Cuadro 4.5. | Indicadores de diversidad de vegetación en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco..... | 59 |
| Cuadro 4.6. | Valoración de sustentabilidad del componente social en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco..... | 60 |
| Cuadro 4.7. | Valoración de la sustentabilidad del componente económico en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco..... | 61 |
| Cuadro 4.8. | Valoración de la sustentabilidad del componente ecológico en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco..... | 62 |

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

| | | |
|--------------------|---|----|
| Cuadro 1.1. | Localización de la región de Los Ríos, Estado de Tabasco, México..... | 8 |
| Cuadro 1.2. | Usos del suelo y vegetación en el periodo 1947-2019 en la región de Los Ríos, Tabasco, México..... | 14 |
| Cuadro 1.3. | Superficies de las principales transiciones de cambio de uso agrícola y vegetación en la región de Los Ríos, Tabasco, México... | 18 |

CAPÍTULO II

| | | |
|--------------------|---|----|
| Figura 2.1. | Ubicación geográfica del área de estudio y la distribución de los puntos de muestreo de los suelos de la Región de Los Ríos, Tabasco, México..... | 26 |
| Figura 2.2. | Porcentaje de muestras en las siete clases texturales identificadas en el estudio de los suelos de la Región de Los Ríos, Tabasco, México..... | 30 |
| Figura 2.3. | Espectros VIS-NIR-SWIR de las muestras de suelos de la Región de los Ríos de Tabasco, México..... | 33 |
| Figura 2.4. | Grupos por clases del ICS para las muestras tomadas en la Región de Los Ríos, Tabasco, México..... | 36 |

CAPÍTULO III

| | | |
|--------------------|---|----|
| Figura 3.1. | Localización de la región de Los Ríos, Estado de Tabasco, México. | 41 |
|--------------------|---|----|

CAPÍTULO IV

| | | |
|--------------------|--|----|
| Figura 4.1. | Índices de sustentabilidad por componente social, económico y ecológico de los usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco, México..... | 63 |
| Figura 4.2. | Índice de sustentabilidad general de usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco, México..... | 64 |

INTRODUCCIÓN GENERAL

El estado de la cubierta vegetal de la tierra se ha convertido en un tema importante para la conservación de la biodiversidad global, debido a las altas tasas de pérdida de bosques, especialmente en zonas tropicales (Ranagalage et al., 2020), por efecto de la sustitución de la vegetación por usos del suelo agropecuarios asociados al crecimiento de la población humana (Mekasha et al., 2020). Los cambios abruptos que experimentan los paisajes de un determinado territorio, contribuyen al deterioro ambiental (Nájera *et al.*, 2010; Nené-preciado *et al.*, 2017).

A nivel mundial, la expansión de la frontera agrícola, ganadera y el crecimiento de la población han causado la pérdida de 73% de los bosques tropicales (FAO y PNUMA, 2020; Rojas et al., 2020). En México, entre 1976 y 2007, las superficies de cultivo y pastizal incrementaron 21% (Velázquez et al., 2002), paralelo a la deforestación del 8.3% de bosques y selvas (Rosete-Vergés et al., 2014). En el estado de Tabasco, en el periodo 1940-2006, el uso agropecuario deforestó entre 63.4 y 90% de las selvas (Sánchez, 2005; Zavala-Cruz y Castillo-Acosta, 2007). Tan solo los proyectos agropecuarios Plan Chontalpa y Plan Balancán-Tenosique eliminaron 915000 ha de selvas y vegetación secundaria (37.1% de la entidad) entre 1960 y 2000 (Isaac-Márquez et al., 2008; Geissen et al., 2009; San Pallo et al., 2019).

Los cambios de la vegetación a usos agropecuarios han repercutido a escalas global, regional y local (Liu et al., 2019; Lone y Mayer, 2019), ocasionando presión sobre los recursos suelo, agua y nutrientes (Dhar et al., 2019; Lone y Mayer, 2019), pérdida de servicios ecosistémicos (regulación hidrológica y climática, formación y retención del suelo, aprovisionamiento de alimentos, fibras, materias primas, recursos genéticos y servicios culturales) (Liu et al., 2019; Hasan et al., 2020), y degradación de suelos mediante procesos de erosión y desertificación (Obade y Lal, 2013).

El suelo es uno de los recursos más explotados del planeta, proporciona los medios para proveer alimentos, fibras y agua de manera sostenible, y ayuda a mantener la seguridad alimentaria que cada día es más desafiante debido al incremento de la demanda (Pozz y Field, 2020). No obstante, el suelo está sufriendo procesos de

degradación química y física, como la erosión del suelo, compactación y pérdida de nutrientes (FAO y ITPS, 2015; Jian *et al.*, 2020), provocado el deterioro de amplias superficies del recurso y no se están creando los mecanismos suficientes que ayuden a su recuperación (Amundson *et al.*, 2015).

Con base en estos antecedentes, es importante conocer el estado en que se encuentra el suelo de una región, para garantizar que su calidad beneficie a las generaciones futuras (Mirghaed y Sourì, 2022). La calidad del suelo es definida como la capacidad de un suelo para funcionar y promover la productividad de las plantas y los animales, y mantener o mejorar la calidad del agua y el aire (Bünemann *et al.*, 2018), es un concepto que ayuda a evaluar el recurso utilizando indicadores cualitativos y cuantitativos (Muñoz-Rojas, 2018). Los indicadores de evaluación deben ser lo más simple posibles para facilitar su aplicación e interpretación (Mukhopadhyay *et al.*, 2014).

Las metodologías para la determinación de los indicadores de calidad del suelo deben proporcionar resultados expeditos y con una capacidad de predicción comparable a los análisis de laboratorio convencionales para que se obtengan análisis rápidos y rentables (Demattê *et al.*, 2019; Recena *et al.*, 2019). El uso del espectrofotómetro de infrarrojo cercano (NIRS) y el análisis quimiométrico de los datos, destacan por sus aplicaciones exitosas en el estudio de las propiedades físicas y químicas del suelo y la evaluación de la calidad del suelo, de manera rápida, confiable y económica; lo cual facilita la toma de decisiones con respecto a su manejo y conservación (Liu *et al.*, 2020; Gruszczyński y Gruszczyński, 2022). También se puede utilizar el análisis de laboratorio híbrido para optimizar el estudio del suelo, con un mejor control de calidad (Demattê *et al.*, 2019; Recena *et al.*, 2019).

El estado en que se encuentra la calidad de suelo es influenciado por los diferentes usos, los cuales tienen efecto sobre cada una de las dimensiones de la sustentabilidad, especialmente, la ecológica (balance de nutrientes, carbono del suelo, el uso de la energía, el impacto por uso de agrotóxicos, etc.) (Chamorro y Sarandón, 2021). La evaluación de la sustentabilidad concentra información de variables económicas, ambientales y sociales (Pinedo-Taco *et al.*, 2021), con la participación de productores, combinado con la utilización de otros indicadores de sustentabilidad,

para conocer el manejo de los agrosistemas (Iglesias-Gómez et al., 2022).

La región de Los Ríos (RR), estado de Tabasco, conformada por los municipios de Emiliano Zapata, Balancán y Tenosique, ha sufrido cambios de uso del suelo, principalmente inducidos por el plan Balancán-Tenosique (Isaac-Márquez et al., 2008; Geissen *et al.*, 2009). Dichos cambios se han asociado a usos agropecuarios no sustentables que han provocado degradación de suelos en el 70% de Tabasco (Ortiz-Solorio *et al.*, 2011), con efectos negativos en las propiedades físicas, químicas (Geissen *et al.*, 2009) y erosión hídrica en lomeríos y sierras (Palma-López et al., 2008). A la fecha se han realizado pocas investigaciones enfocadas a evaluar la calidad del suelo relacionado con cambios de uso agropecuario en Tabasco.

La presente investigación contribuirá a generar conocimiento sobre la situación actual de los usos agropecuarios y la vegetación natural de la RR, conocer la calidad de los suelos con usos agropecuarios en diferente tiempo de establecimiento, y caracterizar los niveles de sustentabilidad de los usos. Los resultados podrán ser utilizados por las instituciones encargadas de la toma de decisiones sobre la planificación del territorio, mediante la elaboración de programas de ordenamiento territorial y ecológico, planes de manejo sustentables para la recuperación y conservación de los recursos suelo y vegetación, con el fin de mejorar la calidad de los suelos e impulsar sus niveles de producción, y mantener los servicios ecosistémicos de la RR.

El objetivo general de esta investigación fue: evaluar el cambio de vegetación natural a usos agrícolas y su efecto en la calidad del suelo en la región de Los Ríos, estado de Tabasco. Y los objetivos específicos fueron: a) Evaluar el cambio de uso de suelo en el periodo 1947–2019 en la región de Los Ríos, b) Evaluar la calidad de los suelos en usos agrícolas con diferente tiempo de establecimiento en la región de Los Ríos y c) Valorar la sustentabilidad de usos agrícolas mejoradores de la calidad de los suelos afectados por cambio de uso.

Los resultados de la investigación de tesis se presentan en cuatro capítulos. En el capítulo uno se analizó el cambio de vegetación natural a uso del suelo agropecuario en el periodo 1947-2019. Se encontró que la vegetación natural fue sustituida mayormente por usos agropecuarios como cultivos, pastizales y plantaciones forestales, seguidos de asentamientos humanos; estos usos aumentaron de 14.2 a

61.8%, en 72 años, lo que contribuyó a la pérdida del 63.9 % de la vegetación, y la deforestación del 83.7% de las selvas.

En el capítulo dos se realizó una investigación para establecer un índice de calidad de los suelos (ICS) en la RR, con modelación utilizando la tecnología del espectrofotómetro de infrarrojo cercano (NIRS, siglas en inglés) y la quimiometría para evaluar el suelo Cambisol (CM) con diferentes usos. Se registraron los espectros de cada muestra de suelo y mediante interpretación quimiométrica se demostró que es posible establecer un modelo de análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) para predecir el índice de calidad de suelo (ICS). Se predijo que 14 sitios se encuentran degradados (clase 1), 14 con alto riesgo de degradación física (clase 2), en conjunto el 58 % de los sitios presentaron baja calidad, principalmente en usos de CT y CA, 10 con moderado riesgo a la degradación (clase 3) y 10 estructuralmente estables (clase 4).

En el capítulo tres, se evaluó el suelo CM con cuatro usos agropecuarios: cultivo de temporal (CT), cultivo anual (CA), pastizal (Pa) y vegetación secundaria (VS), establecidos en tres tiempos (1984, 2000 y 2019), con cuatro repeticiones. Los análisis de varianza y comparación de medias evidenciaron que los contenidos de materia orgánica (MO) y densidad aparente (DA) fueron los mejores indicadores de calidad del suelo afectado por el cambio de uso agropecuario y tiempo de uso. Los usos con vegetación secundaria (VS) en los tres años de evaluación (1984, 2000 y 2019), evidenciaron mayor calidad de suelo en comparación con CM con cultivos de temporal (CT) y anuales (CA) en la región de Los Ríos (RR), Tabasco.

En el capítulo cuatro se valoró la sustentabilidad de tres usos agropecuarios en el suelo CM. Se seleccionaron indicadores de sustentabilidad de los componentes social, económico y ecológico, mediante revisión de literatura. Se aplicó una entrevista a productores de la RR. En los usos de suelo se colectó vegetación para determinar los índices de diversidad. Los resultados de las entrevistas se compararon con los indicadores de los componentes para conocer los niveles de sustentabilidad de los usos agropecuarios. Se concluyó que los usos agropecuarios de la región de la RR, por componentes social, económico y ecológico, presentaron indicadores de sustentabilidad: a) positivos en escolaridad, migración, empleo, superficie de

producción, satisfacción de necesidades, productividad, índice de Shannon, índice de equidad de Pielou, nitrógeno y clase de tierra, y b) negativos en número de acciones para recuperar la producción ante eventos hidrometeorológicos, ingreso por productividad de los usos agropecuarios y acciones para la conservación de tierras.

CAPÍTULO I. CAMBIO DE USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN EN 1947-2019 EN LA REGIÓN LOS RÍOS, TABASCO, MÉXICO

1.1 RESUMEN

La expansión del uso agropecuario genera cambios de cobertura vegetal, pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos. Objetivo: Analizar el cambio de uso agrícola y su efecto en la vegetación natural en la región de Los Ríos, Tabasco, México, durante el periodo 1947-2019. Materiales y métodos: Se identificaron 14 clases de uso de suelo y vegetación mediante fotografías aéreas de 1947 y clasificación supervisada de imágenes de satélite, verificando las de 1947 al 2000 con cartografía publicada y las de 2019 (Landsat 8) en campo. El cambio de uso de suelo y vegetación se analizó mediante superposición y comparación de los mapas con el módulo Land Change Modeler integrado en el programa TerrSet. Resultados y discusión: En 72 años, la vegetación natural fue sustituida mayormente por cultivos, pastizales y plantaciones forestales, seguidos de asentamientos humanos. Estos usos, en conjunto, representaban 14.2 % de la superficie de la región y aumentaron a 61.8 %; es decir, un incremento de 435 %. Dichos usos sustituyeron áreas de selva, vegetación secundaria e hidrófita, las cuales pasaron de 82.3 a 29.7 %, representando una pérdida de 64 % de estas coberturas. Entre 1947 y 1984, la vegetación natural sufrió la mayor pérdida de área (53.7 %). Conclusiones: La pérdida de vegetación natural en la región se dio a causa del incremento en la superficie de uso agrícola y asentamientos humanos. La ampliación de la superficie agropecuaria fue impulsada por programas gubernamentales sin considerar el factor ambiental.

1.2 ABSTRACT

The spread of agricultural use leads to changes in vegetation cover, loss of biodiversity and ecosystem services. To analyze land use change and its effect on natural vegetation in the region of Los Ríos, Tabasco, Mexico, during the period 1947-2019. A total of 14 land use and vegetation classes were identified using aerial photographs from 1947 and supervised classification of satellite images, verifying those from 1947 to 2000 with published cartography and those from 2019 (Landsat 8) in the field. Land

use and vegetation cover change was analyzed by overlaying and comparing the maps with the Land Change Modeler module integrated in the TerrSet program. In 72 years, natural vegetation was mostly replaced by crops, grassland and forest plantations, followed by human settlements. These uses, together, represented 14.2 % of the region's surface and increased to 61.8 %; that is, an increase of 435 %. These uses replaced areas of rainforest, secondary vegetation and hydrophytes, which went from 82.3 % to 29.7 %, representing a loss of 64 % of these coverages. Between 1947 and 1984, natural vegetation suffered the greatest loss of area (53.7 %). The loss of natural vegetation in the region occurred because of the increase in agricultural land and human settlements. The increase in agricultural land was driven by government programs without considering the environmental factor.

1.3 INTRODUCCIÓN

La interacción de los seres humanos con los elementos biofísicos de un territorio genera cambios estructurales a nivel paisaje-ecosistema (Sewnet y Abebe, 2018). La expansión de la frontera agrícola, la ganadería extensiva y el crecimiento poblacional han causado la pérdida del 73% de los bosques tropicales a nivel mundial (FAO y PNUMA, 2020; Rojas et al., 2020), lo que ha repercutido a escalas global, regional y local (Liu et al., 2019; Lone y Mayer, 2019), en mayor presión sobre otros usos del suelo, el agua y los nutrientes (Dhar et al., 2019; Lone y Mayer, 2019), pérdida de servicios ecosistémicos (regulación hidrológica y climática, formación y retención del suelo, aprovisionamiento de alimentos, fibras, materias primas, recursos genéticos y servicios culturales) (Liu et al., 2019; Hasan et al., 2020), y degradación de suelos mediante procesos de erosión y desertificación (Obade y Lal, 2013).

En México, las superficies de cultivo y pastizal incrementaron 21% en el territorio (Velázquez et al., 2002), paralelo a la deforestación del 8.3% de bosques y selvas entre 1976 y 2007 (Rosete-Vergés et al., 2014). En el estado de Tabasco, el uso agropecuario deforestó entre 63.4 y 90% de las selvas en el periodo 1940-2006 (Sánchez, 2005; Zavala-Cruz y Castillo-Acosta, 2007). Tan solo los proyectos agropecuarios Plan Chontalpa y Plan Balancán-Tenosique deforestaron 915000 ha de selvas y vegetación secundaria (37.1% de la entidad) entre 1960 y 2000 (Isaac-Márquez et al., 2008; Geissen et al., 2009; San-Pallo et al., 2019). El cambio de uso

en Tabasco en las últimas décadas se asoció al establecimiento de pastizales y cultivos, a actividades de extracción de madera, industria petrolera, vías de comunicación, asentamientos humanos e incendios forestales, los cuales afectaron selvas, manglares y vegetación secundaria (Geissen et al., 2009; Ramos-Reyes et al., 2021a; Ramos-Reyes et al., 2021b).

Los cambios en la cobertura y uso de suelo, y sus repercusiones ambientales y sociales, requieren del desarrollo de procedimientos para su cuantificación a bajo costo y con mayor precisión en grandes áreas geográficas (Yulianto et al., 2016). El análisis de materiales de percepción remota (fotografías aéreas, imágenes de satélite y drones), mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) eficaces y confiables para manejar grandes volúmenes de información (Chuvieco, 2002), ha impulsado la cartografía temática de cobertura (Yulianto et al., 2016). En ese sentido, el módulo Land Change Modeler (LCM) es una herramienta que permite modelar el cambio de uso de suelo parametrizado empíricamente, basado en un análisis del cambio histórico de la cobertura del suelo, integra el análisis de los datos, especialmente la noción de cambios de ocupación/usos del suelo (Camacho-Olmedo et al., 2010; Eastman y Toledano, 2018). De este modo, el estudio multitemporal del uso del suelo y vegetación contribuye a comprender las variaciones de las coberturas y a predecir las tendencias en el tiempo, con información útil para que los planificadores y tomadores de decisiones puedan proponer acciones de desarrollo sustentable, ordenamiento territorial, y mitigación a la problemática ambiental y al cambio climático (Hasan et al., 2020; Tahmasebi et al., 2020). Este estudio tuvo como objetivo analizar el cambio de uso agrícola y su efecto en la vegetación natural en la región de Los Ríos (RR), Tabasco, México, en el periodo 1947-2019.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la RR, en los municipios de Balancán, Emiliano Zapata y Tenosique, ubicada al este del estado de Tabasco, en un área de 6 234.2 km² (24.7% de la entidad); colinda al norte y oeste con los estados de Campeche y Chiapas, y al este y sur con la República de Guatemala (Figura 1.1). De norte a sur, prevalecen los climas cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw), cálido húmedo con lluvias abundantes en verano (Am), y cálido húmedo con lluvias abundantes todo el año (Af);

la precipitación media anual varía de 1 600 a 2 000 mm, y la temperatura media anual oscila de 26 a 28°C (Aceves-Navarro y Rivera-Hernández, 2019). La región presenta geformas de planicies, lomeríos y montañas, drenadas por los ríos Usumacinta y San Pedro (Salgado-García et al., 2017).

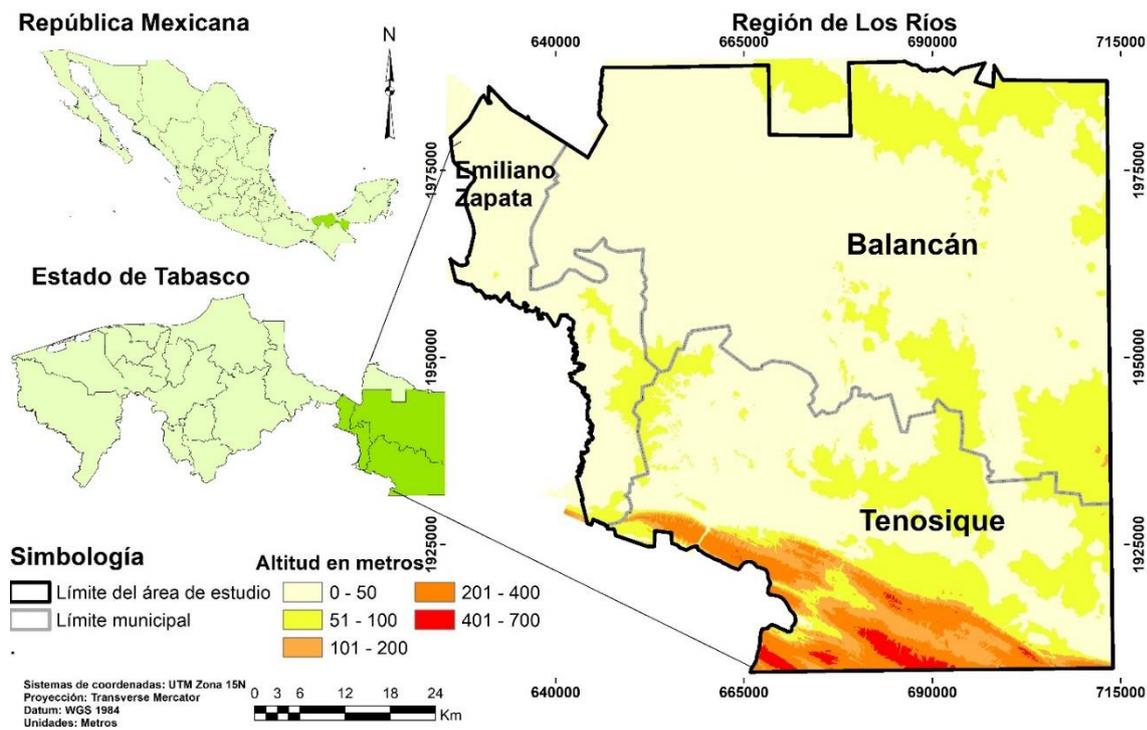


Figura 1.1 Localización de la región de Los Ríos, Estado de Tabasco, México.

1.4.1 Fuentes de datos para la cartografía de uso de suelo y vegetación

Se obtuvieron fotografías áreas blanco y negro de 1947 a escala 1:20000 de la compañía AEROFOTO. Para 1984, 2000 y 2019 se adquirieron imágenes satelitales con tamaño de píxel de 30 x 30 m, descargadas en el portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Landsat collection 1 level-2,- on-demand) (Cuadro 1.1), con corrección atmosférica y geográfica (USGS, 2019). Las imágenes seleccionadas presentaron bajo porcentaje de nubosidad, excepto la de julio 2019 que presentaba nubosidad en la parte sur, esto se resolvió generando una capa de nubes de ese mes y recortando la imagen sin nubes de marzo del mismo año, esta imagen complementó la de julio; un procedimiento similar fue aplicado por Lin et al., (2013) en áreas con nubosidad.

Cuadro 1.1 Características de las imágenes satelitales utilizadas en el análisis de cambio de uso de suelo de la región de Los Ríos, Tabasco, México (Descargadas de <https://earthexplorer.usgs.gov/>).

| Fecha de adquisición | Satélite | Identificador del sensor | Resolución (m) | Path | Row | Nubosidad (%) |
|----------------------|-----------|--------------------------|----------------|------|-----|---------------|
| 25-noviembre-1984 | Landsat 5 | TM | 30 X 30 | 21 | 48 | 0 |
| 05-diciembre-1999 | Landsat 5 | TM | 30 X 30 | 21 | 48 | 2 |
| 31-marzo-2019 | Landsat 8 | OLI_TIRS | 30 X 30 | 21 | 48 | 1 |
| 05-julio-2019 | Landsat 8 | OLI_TIRS | 30 X 30 | 21 | 48 | 0.94 |

1.4.2 Clasificación de fotografías aéreas e imágenes satelitales

Las fotografías aéreas de 1947 fueron georreferenciadas y fotointerpretadas con base en criterios de tono y textura para generar una capa vectorial de usos de suelo y vegetación (Chuvieco, 2002). En el preprocesamiento de las imágenes se utilizó el apilamiento de las bandas para convertirlas en una sola capa, se recortó el área de interés de cada imagen y se realizaron las combinaciones de banda de color natural 3-2-1 (rojo: 3 verde: 2 azul: 1) y 4-3-2 para el infrarrojo cercano (rojo: 4 verde: 3 azul: 2) (Chuvieco, 2002; Congedo, 2016).

Se revisó literatura y cartografía sobre usos del suelo y tipos de vegetación de la RR (López-Mendoza, 1980; INEGI, 1984; Vázquez-Negrín et al., 2011; INEGI, 2017) (Cuadro 1.2); el nombre de la vegetación y sus acrónimos se adoptaron de la nomenclatura del INEGI (2017). Posteriormente se realizó una interpretación visual de las imágenes de satélite, comparando la información cartográfica con las firmas espectrales resultantes de la combinación de banda RGB (3-2-1 y 4-3-2) en cada fecha; las variaciones de tonalidad se asociaron a clases de uso de suelo y tipos de vegetación (Tarawally et al., 2019) obtenidas en la revisión bibliográfica. A continuación, se crearon regiones de interés para cada clase de uso de suelo y vegetación (Congedo, 2016), y se procedió a la clasificación supervisada (Obodaia, Adjei, Odaia y Lumor, 2019). El análisis de las imágenes satelitales se realizó con la

extensión de Plugin Clasificación Semiautomática (SCP) que es un complemento de código abierto y gratuito del software QGIS 3.8.3 (Congedo, 2016; Dhar et al., 2019). La precisión del mapa de uso de suelo y vegetación de 2019 se evaluó con un muestreo aleatorio de sitios con usos de suelo, vegetación, cuerpos de agua y asentamientos humanos; las coordenadas geográficas se almacenaron en un GPS Garmin eTrex, y de Google Earth Pro; en el campo se validaron 644 puntos. La eficacia de la clasificación se obtuvo mediante sobreposición de la información de los sitios validados en el mapa de uso y vegetación, se generó una matriz de confusión y se calculó el índice de Kappa (Dhar et al., 2019; Obodaia et al., 2019).

Cuadro 1.2 Usos del suelo y tipos de vegetación de la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Coberturas | Clave | Características |
|-------------------------|-------|---|
| Cultivo temporal | CT | Maíz (<i>Zea mays</i> L.), sorgo [<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench], arroz (<i>Oryza sativa</i> L.), frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.), calabaza (<i>Cucurbita argyrosperma</i> C.Huber) |
| Cultivo anual | CA | Papaya (<i>Carica papaya</i> L.), caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i> L.) |
| Cultivo permanente | CP | Palma de aceite (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.) |
| Plantaciones forestales | PF | Eucalipto (<i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill), teca (<i>Tectona grandis</i> L.f.), melina (<i>Gmelina arborea</i> Roxb.), cedro (<i>Cedrela odorata</i> L.) |
| Pastizal | P | Comunidades herbáceas dominadas por gramíneas o graminoides utilizadas para el pastoreo de ganado vacuno (ganadería) |

| | | |
|--|------|--|
| Selva alta perennifolia | SAP | <i>Guatteria grandiflora</i> Donn. Sm., <i>Dialium guianense</i> (Aubl.) Sandwith, <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess., <i>Brosimum alicastrum</i> Sw. |
| Selva mediana subperennifolia y subcaducifolia | SMSP | <i>Bucida buceras</i> L., <i>Cedrela odorata</i> L., <i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg., <i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) Bertero ex A. DC. |
| Selva baja inundable | SBI | <i>Pachira aquatica</i> Aubl., <i>Annona glabra</i> L., <i>Haematoxylum campechianum</i> L. |
| Sabana | S | Vegetación con árboles que crecen esparcidos entre praderas de gramíneas (<i>Curatella americana</i> L., <i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth., <i>Crescentia alata</i> Kunth., <i>C. cujete</i> L.) |
| Vegetación secundaria | VS | Acahuales en diferente fase de sucesión, cuya vegetación original de selva fue afectada por las actividades humanas |
| Vegetación hidrófita | VH | Comunidades dominadas por plantas acuáticas o semiacuáticas (<i>Thalia geniculata</i> L., <i>Typha domingensis</i> Pers., <i>Cladium jamaicense</i> Crantz.) |
| Asentamiento humano | AH | Conglomerado demográfico urbano |
| Suelo desnudo | SD | Superficie sin vegetación |
| Cuerpos de agua | Ca | Superficies cubiertas de agua (ríos, lagunas) |

Para evaluar la precisión de los mapas de 1947, 1984 y 2000, se utilizó cartografía e información de estudios de uso y vegetación regionales (López-Mendoza, 1980; INEGI, 1984; INEGI, 2001; Estrada-Loreto et al., 2013; Hernández-Rojas et al., 2018). La cartografía de cada año se georreferenció y sobrepuso en los mapas de uso de suelo y vegetación de las imágenes satelitales clasificadas, se generaron puntos con

referencia geográfica, se elaboraron los índices de Kappa con la información obtenida de las matrices de confusión que indican la probabilidad de que un píxel clasificado en una categoría corresponda realmente a esa categoría, las cuales fueron generadas con el módulo SCP del software QGIS 3.8.3 para obtener la precisión general entre el mapa clasificado y la información de referencia (Dhar et al., 2019; Obodaia et al., 2019).

1.4.3 Análisis de cambio de uso de suelo y vegetación

El análisis de cambio de uso de suelo y vegetación en los diferentes años se realizó mediante superposición y comparación de los mapas utilizando el módulo Land Change Modeler integrado en el software TerrSet, éste se basa en redes neuronales artificiales que permiten analizar los cambios en espacio y tiempo en un área determinada, genera mapas de cambio de uso del suelo, en dos pasos: a) análisis de cambio y b) modelado de potencial de matriz de transición (Camacho-Olmedo et al., 2010; Eastman, 2016). En esta matriz, las filas representan las clases del mapa del tiempo uno (T1) y las columnas las clases del mapa del tiempo dos (T2), la diagonal principal muestra las clases estables del T1 y T2, y los elementos fuera de la diagonal son las transiciones ocurridas entre ambos periodos, con esta información se generan los gráficos de pérdidas, ganancias, cambio neto y persistencia de las clases evaluadas (Pineda-Jaimes et al., 2009; Eastman, 2016; Tarawally et al., 2019).

1.5 RESULTADOS

1.5.1 Uso del suelo y vegetación en el periodo 1947-2019

Los mapas de uso del suelo y vegetación de 1947, 1984, 2000 y 2019 tuvieron una precisión general de 75.8%, 72.7%, 75.2% y 71.1% respectivamente, y los índices de Kappa fueron 0.72, 0.69, 0.73 y 0.68, para los mismos años.

En 1947 los CT y P, juntos se distribuían en el 14.1% de la RR. La vegetación natural ocupaba la mayor superficie (82.3%), predominaban las selvas (SAP, SMSP, SBI) con un 61.5%, seguidas de S, VS y VH. Los AH, SD y CA ocupaban superficies pequeñas (Cuadro 1.3 y Figura 1.2).

En 1984 los usos agropecuarios pasaron a ocupar la mayor superficie de la RR (54.3%), con mayor cobertura de P y menor de cultivos. Las áreas de vegetación presentaron tendencias diferentes, las selvas redujeron su superficie a 12.9%, la S desapareció, y la vegetación VS y VH mostraron incremento (26.1%). Los AH, SD y CA aumentaron su área (Cuadro 1.3 y Figura 1.2).

En el año 2000 los usos agropecuarios ocupaban 52.7% de la RR, con predominio de P sobre los cultivos. Las PF aparecieron en una superficie mínima. El área cubierta por selvas se mantuvo (13%), la VS disminuyó y la VH incrementó ligeramente en comparación con la superficie de 1984. Los AH, SD y CA continuaron creciendo (11,7%) (Cuadro 1.3 y Figura 1.2).

En 2019 los usos agropecuarios alcanzaron la mayor superficie (60.5%) en la RR, con incremento de CT, CP y P. Las PF ampliaron su área. La superficie de vegetación de selvas disminuyó al 10%, la VS se mantuvo y la VH decreció respecto al año 2000. Los AH y SD continuaron creciendo, y los CA perdieron superficie (Cuadro 1.3 y Figura 1.2).

Cuadro 1.3. Superficies de usos del suelo y tipos de vegetación en el periodo 1947-2019 en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Coberturas | 1947 | 1947 | 1984 | 1984 | 2000 | 2000 | 2019 | 2019 |
|------------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|
| | km ² | % |
| CT | 140.8 | 2.6 | 358.1 | 6.6 | 300.6 | 5.5 | 864.2 | 15.8 |
| CA | - | - | 548.9 | 10.1 | 884.2 | 16.2 | 357.3 | 6.5 |
| CP | - | - | - | - | - | - | 94.7 | 1.7 |
| PF | - | - | - | - | 6.3 | 0.1 | 241.4 | 4.4 |
| P | 628 | 11.5 | 2 051.4 | 37.6 | 1 689.8 | 30.9 | 1 753.6 | 32.1 |
| SAP | 1 782.9 | 32.7 | 338.3 | 6.2 | 314.5 | 5.8 | 275 | 5.0 |
| SMSP | 1 296.3 | 23.7 | 94.6 | 1.7 | 70.6 | 1.3 | 131.7 | 2.4 |
| SBI | 280.5 | 5.1 | 272.8 | 5.0 | 323.5 | 5.9 | 141 | 2.6 |
| S | 310.2 | 5.7 | - | - | - | - | - | - |
| VS | 473.8 | 8.7 | 1 044.1 | 19.1 | 823.4 | 15.1 | 812 | 14.9 |
| VH | 348.6 | 6.4 | 382.4 | 7.0 | 402.7 | 7.4 | 263.9 | 4.8 |

| | | | | | | | | |
|-------|--------|-----|---------|-----|--------|-----|---------|-----|
| AH | 3.2 | 0.1 | 41.1 | 0.8 | 51.3 | 0.9 | 64 | 1.2 |
| SD | 3.9 | 0.1 | 56.5 | 1.0 | 262.9 | 4.8 | 291.8 | 5.3 |
| Ca | 191.6 | 3.5 | 271.8 | 5.0 | 330.1 | 6.0 | 169.3 | 3.1 |
| Total | 5459.9 | 100 | 5 459.9 | 100 | 5459.9 | 100 | 5 459.9 | 100 |

Nota: CT= Cultivo temporal, CA= Cultivo anual, CP= Cultivo permanente, PF= Plantación forestal, P= Pastizal, SAP= Selva alta perennifolia, SMSP= Selva mediana subperennifolia y subcaducifolia, SBI= Selva baja inundable, S= Sabana, VS= Vegetación secundaria, VH= Vegetación hidrófita, AH= Asentamientos humanos, SD= Suelo desnudo, Ca= Cuerpos de agua.

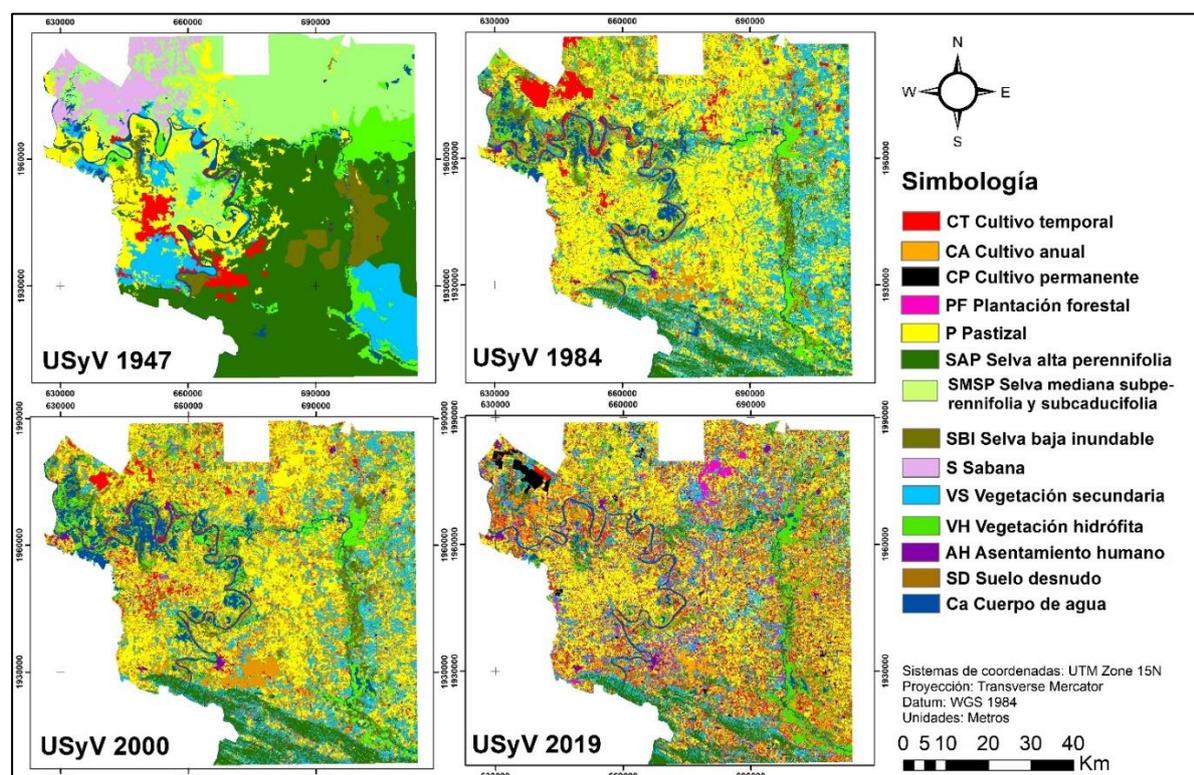


Figura 1.2 Usos del suelo y vegetación en el periodo 1947-2019 en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

1.5.2 Pérdidas, ganancias y persistencias de usos del suelo y vegetación

El balance entre pérdidas, ganancias y cambio neto de superficies de usos agropecuarios, vegetación y otros usos, entre 1947 y 2019, evidencian dinámicas diferentes en la RR. En el periodo 1947-1984, los cultivos y P tuvieron el mayor cambio neto positivo con 2185.7 km². Entre 1984 y 2000, solo los CA mostraron un cambio neto positivo, e inició la introducción de PF. Para el periodo 2000-2019, se observó un

cambio neto positivo en P y cultivos, excepto en los CA. Destacan los CT por presentar el mayor cambio neto favorable en 72 años, y las PF y CP que cubrieron 329.5 km² (Cuadro 1.4).

La vegetación de selvas y S presentaron cambios netos negativos en todos los periodos, siendo mayor entre 1947 y 1984 con 1622.9 km². La VS y VH mostraron cambios netos positivos entre 1947 y 1984, y negativos entre 1984 y 2019. Los AH y SD presentaron cambios netos positivos en los tres periodos de evaluación. Y los CA reportaron cambios netos positivos entre 1947 y 2000, y negativos entre 2000 y 2019 (Cuadro 1.4).

1.5.3 Transición de cambio de uso del suelo y vegetación

Entre 1947 y 1984, la principal transición de la vegetación de selvas, S y VS fue hacia P, seguido de CA y CT. Algunas áreas de P y CT cambiaron a otro uso agrícola. En los periodos 1984-2000 y 2000-2019, las mayores transiciones ocurrieron dentro de la zona de uso agropecuario. La alternancia fue de P a cultivos, PF y VS, y de cultivos a P y VS. La vegetación se modificó de VS y VH a P y cultivos, y de selva a VS (Figuras 1.3b y 1.3c).

Cuadro 1.4 Pérdidas, ganancias, cambio neto y persistencias (km²) de usos de suelo y vegetación (USyV) en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| USyV | 1947-1984 | | | | 1984-2000 | | | | 2000-2019 | | | |
|------|-----------|---------|----------|-------|-----------|--------|--------|---------|-----------|-------|--------|-------|
| | P | G | CN | PE | P | G | CN | PE | P | G | CN | PE |
| CT | -124.9 | 342.2 | 217.2 | 15.7 | -293.1 | -235.6 | -57.5 | 65.0 | -252.9 | 816.3 | 563.4 | 47.7 |
| CA | 0 | 548.3 | 548.3 | 0 | -400.0 | 735.3 | 335.3 | 148.9 | -800.4 | 273.7 | -526.7 | 83.6 |
| CP | - | - | - | - | - | - | - | - | 0 | 94.7 | 94.7 | 0 |
| PF | - | - | - | - | 0 | 6.3 | 6.3 | 0 | -6.2 | 241 | 234.8 | .1 |
| P | -360.0 | 1 780.1 | 1 420.1 | 269.8 | -961.9 | 600.3 | -361.6 | 1 089.5 | -868.7 | 932.5 | 63.9 | 821.2 |
| SAP | -1530.7 | 74.8 | -1455.9 | 256.8 | -148.7 | 125.0 | -23.7 | 190.2 | -180.6 | 141.3 | -39.4 | 133.6 |
| SMSP | -1270.9 | 81.3 | -1 189.6 | 13.3 | -88.5 | 64.6 | -23.9 | 6.0 | -62.2 | 123.3 | 61.1 | 8.4 |
| SBI | -240.2 | 232.6 | -7.5 | 40.1 | -154.8 | 205.5 | 50.7 | 118 | -281.2 | 98.7 | -182.4 | 42.2 |
| S | 310.2 | 0 | -310.2 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| VS | -359.8 | 934.9 | 575.1 | 106.4 | -673.8 | 453.1 | -220.7 | 30.3 | -630.3 | 618.9 | -11.4 | 193.0 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|-------|------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| VH | -228.8 | 261.9 | 33.1 | 119.1 | -200.0 | 220.3 | 20.2 | 182.4 | -288.3 | 149.4 | -138.9 | 144.1 |
| AH | -3.2 | 41.0 | 37.9 | .0 | -26.7 | 36.9 | 10.2 | 14.4 | -26.0 | 38.7 | 12.7 | 25.3 |
| SD | -3.9 | 56.4 | 52.5 | .0 | -47.6 | 254.0 | 206.4 | 8.9 | -245.8 | 274.7 | 28.9 | 17.1 |
| Ca | -49.3 | 125.3 | 76.0 | 142.8 | -46.2 | 104.5 | 58.3 | 225.6 | -190.8 | 30.4 | -160.4 | 138.9 |

Nota: USyV= Uso de suelo y vegetación, P= Pérdidas, G= Ganancias, CN= Cambio neto, PE= Persistencias. CT= Cultivo temporal, CA= Cultivo anual, CP= Cultivo permanente, PF= Plantación forestal, P= Pastizal, SAP= Selva alta perennifolia, SMSP= Selva mediana subperennifolia y subcaducifolia, SBI= Selva baja inundable, S= Sabana, VS= Vegetación secundaria, VH= Vegetación hidrófita, AH= Asentamientos humanos, SD= Suelo desnudo, Ca= Cuerpos de a

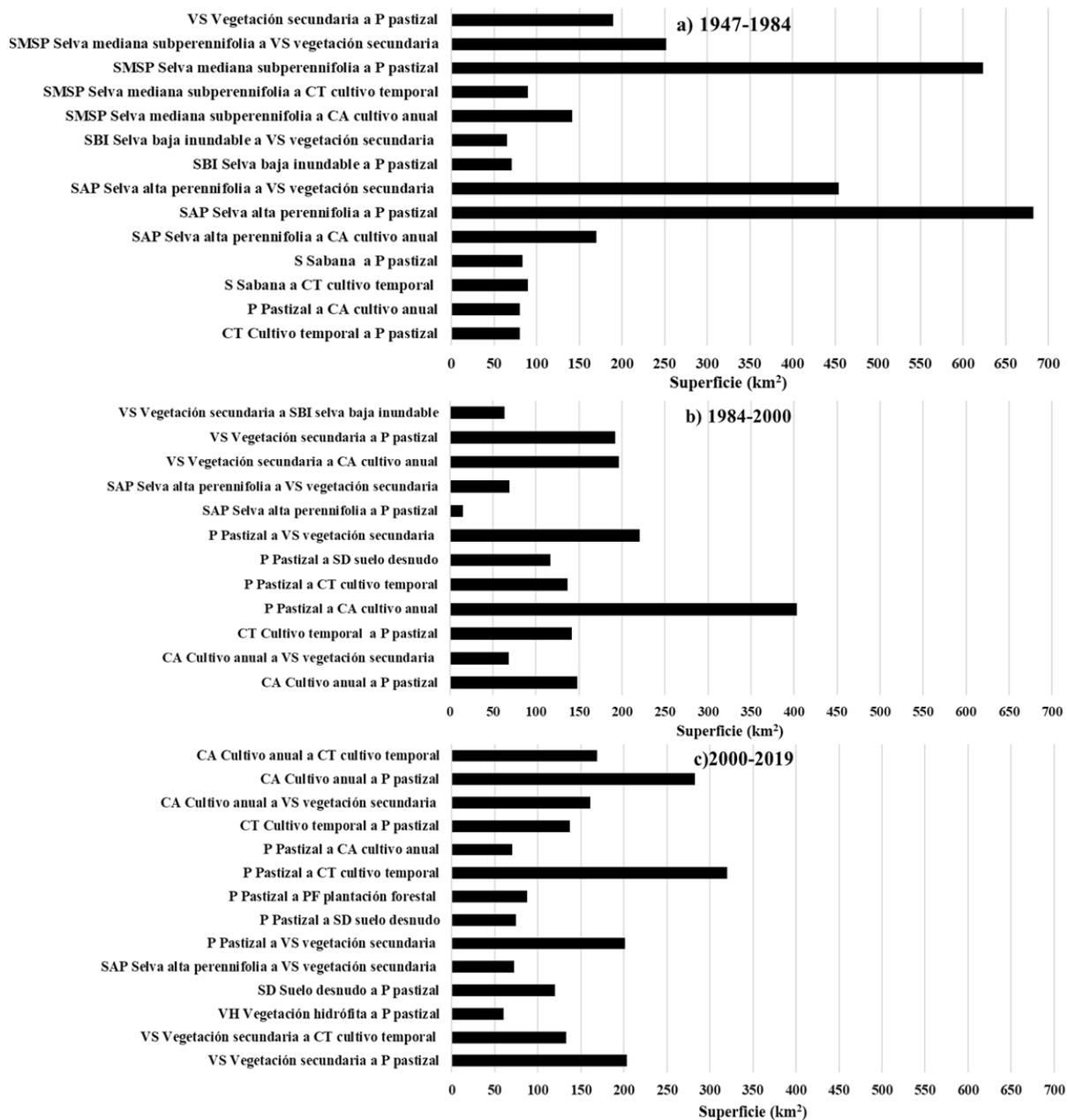


Figura 1.3 Superficies de las principales transiciones de cambio de uso agrícola y vegetación en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

1.6 DISCUSIÓN

Los valores de precisión de los mapas de uso de suelo y vegetación de 1947, 1984, 2000 y 2019, indican que son aceptables (Dhar et al., 2019), y los índices de Kappa (K) de

estos mapas evidencian que la clasificación de uso de suelo es buena (Sewnet y Abebe, 2018; Satya et al., 2020). Estos resultados denotan que el uso de técnicas de teledetección y módulos como el Land Change Modeler (LCM) contribuyen a generar cartografía con buena precisión y clasificación sobre usos del suelo agropecuarios y vegetación, similar a lo obtenido por Ramos-Reyes et al. (2021b).

Los datos de cambio de uso del suelo en la RR, en el periodo 1947-2019, con intervalo de 72 años, indican cambios drásticos en la vegetación. Sobresale la pérdida de vegetación natural, que en 1947 cubría 82.3%, la mayor superficie correspondía a SAP, SMSP y SBI; en 2019 la vegetación natural alcanzó su menor superficie con 29.7%. La pérdida más notable ocurrió en las selvas cuya extensión varió del 61.5 al 10% en la RR. Inversamente, en el mismo periodo, el uso agropecuario representado por cultivos temporales y pastizales creció del 14.1 al 61.8%; estos usos, junto con el urbano, determinaron los patrones de cambio de uso del suelo y la alteración de los ecosistemas originales mediante deforestación (Satya et al., 2020).

El deterioro de la vegetación en la RR se aceleró con la puesta en marcha de los planes agropecuarios Plan Chontalpa y Plan Balancán-Tenosique que deforestaron el 37.1% de la selva de Tabasco entre 1971 y 1982 (San-Pallo et al., 2019). La devastación del recurso vegetal coincide con el incremento de superficies agropecuarias, pastizales y asentamientos humanos a costa de la destrucción del 63.4 al 90% de las selvas de Tabasco entre 1940 y 2006 (Sánchez, 2005; Zavala-Cruz y Castillo-Acosta, 2007), y la pérdida del 8.3 al 13.6% de los bosques y selvas en México, entre 1976 y 2000 (Velázquez et al., 2002; Rosete-Vergés et al., 2014). Cambios de uso del suelo similares han repercutido en la vegetación natural (Mwampamba y Schwartz, 2011; Liu et al., 2019), con pérdida de bosques tropicales del 73 al 83% a nivel mundial (FAO y PNUMA, 2020; Hamunyela et al., 2020), particularmente en el Amazonas, el Congo y el Sureste de Asia (Rosa et al., 2016), y del 12.9% entre 1990 y 2020 en América Latina y el Caribe (FAO, 2020). Además, la eliminación de la vegetación provoca disminución de la biodiversidad y servicios ambientales como la regulación hidrológica, regulación climática, regulación de gases y la formación y retención del suelo (Liu et al., 2019).

Entre 1947 y 1984 la vegetación natural de la RR sufrió la mayor pérdida en el 53.7% de su área, en contraste los usos P y agrícola aumentaron 385%. La ampliación de P correspondió al impulso de la ganadería extensiva de bovinos (Isaac-Márquez et al., 2008; Estrada-Loreto et al., 2013), y la expansión agrícola reflejó el aumento de cultivos básicos (Rojas et al., 2020), sobre todo entre los años cuarenta y sesenta cuando la política de desarrollo rural en la región fomentó la producción de maíz (*Z. mays*), frijol (*P. vulgaris*), arroz (*O. sativa*), chile (*Capsicum* spp), chihua (*C. argyrosperma*) y sandía [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matzum. & Nakai] (Isaac-Márquez et al., 2008; Reyes-Grande, 2015). La implementación del plan Balancán-Tenosique en 1972, aceleró el cambio de uso del suelo debido a la expansión del P y cultivos sobre áreas de selva (San-Pallo et al., 2019).

En el periodo 1984-2000, se mantuvo el predominio del uso agrícola en la RR (17.4 km² año⁻¹), a base de CT básicos para autoconsumo, incluyendo la ocupación de tierras con pendientes abruptas y suelos delgados no aptos para la agricultura (Isaac-Márquez et al., 2008). La apertura de tierras de cultivo se basó en el sistema roza-tumba-quema y, junto con los incendios forestales, mermaron los remanentes de vegetación (3 km² año⁻¹), principalmente selvas (Reyes-Grande, 2015) y VS. El desplazamiento de superficies de vegetación por usos agrícolas es comparable a lo registrado en áreas tropicales de Tanzania (Mwampamba y Schwartz, 2011).

El periodo 1984-2000 se expandió el CA de caña de azúcar, impulsada por el ingenio Azsuremex S.A. de C.V., reemplazando áreas de P, cultivos y vegetación (García-Ortega, 2013); cambios similares se observaron en una cuenca del estado de Sao Paulo, Brasil, impulsado por la política energética, causando degradación de suelos (Couto-Júnior et al., 2019). Los P incrementaron su área mediante la introducción de las especies brizantha [*Urochloa brizantha* (A. Rich.) R.D. Webster] y humidícola [*Urochloa humidicola* (Rendle) Morrone & Zuloaga], para mejorar la producción ganadera, y contribuyeron a eliminar remanentes de selva, VS y VH. Estos cambios de uso concuerdan con lo reportado por Estrada-Loreto et al. (2013) para la RR. Las PF de eucalipto (*Eucalyptus*) se establecieron en superficies pequeñas (Trujillo-Ubaldo et al., 2018), sin atenuar la deforestación de la región.

En el periodo 2000-2019 los cambios de usos agrícolas fueron dinámicos. Los CT aumentaron 29.6 km² año⁻¹, posiblemente en respuesta a apoyos a ejidatarios para cultivos básicos a través del programa federal Sembrando Vida en 2019 (San-Pallo et al., 2019). Inversamente los CA disminuyeron una superficie similar debido a la pérdida de la zafra de caña de azúcar 2018-2019 en el ingenio Azsuremex. El CP de palma de aceite incrementó y desplazó mayormente áreas de P; este cultivo detonó en el 2000 como uno de los principales en Tabasco, con apoyo del Programa Federal Alianza para el Campo (Hernández-Rojas et al., 2018), para aumentar la producción de grasa vegetal y biodiesel, a nivel mundial ha causado deforestación de bosques tropicales (Vijay et al., 2016). Los P presentaron escaso incremento, pero continuaron como uso principal proveedor de forraje para la ganadería extensiva (Geissen et al., 2009). Las PF aumentaron su área con apoyo del Programa Especial Desarrollo Forestal (PEDF) 2013-2018, sustentado en las especies introducidas eucalipto (*E. grandis*), melina (*G. arborea*), teca (*T. grandis*), caoba africana (*Khaya ivorensis* A. Chev.) y cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem.), y las nativas caoba (*Swietenia macrophylla* King.), cedro (*C. odorata*) y macuilís (*T. rosea*). Estas especies han sido fomentadas por las empresas Proteak, Agropecuaria Santa Genoveva y Grupo Forestal de México, por su rápido crecimiento y alto valor comercial para la producción de madera y celulosa para papel (COMESFOR, 2015). Varias plantaciones se desarrollan en tierras agrícolas abandonadas y parecen ser socialmente aceptadas toda vez que proporcionan algunos servicios, similar a las selvas (Boyle et al., 2016). Paralelo al crecimiento del uso agropecuario, los relictos de selva perdieron superficie, siendo afectada además por la extracción de leña, postes y madera (Villanueva-Partida et al., 2019; Hamunyela et al., 2020).

La VH incrementó de área en el periodo previo al 2000, y posteriormente reportó pérdida por avance de los P. El deterioro de superficies de VH concuerda con el impulso de actividades de colonización, apertura de caminos y de nuevas áreas agrícolas y ganaderas en la RR (Isaac-Márquez et al., 2008; Estrada-Loreto et al., 2013), y con la disminución de áreas de humedales por introducción de pastizales para la ganadería (Ramos-Reyes et al., 2021a).

Los Ca incrementaron su área entre 1984 y 2000, y disminuyeron entre 2000 y 2019. La pérdida de superficie se puede atribuir a cambios de uso del suelo en la cuenca alta del río Usumacinta, decremento de la precipitación anual, alza de la temperatura en los últimos años, y la sequía moderada a extrema que experimentó Tabasco en 2019 (CONAGUA, 2019).

1.7 CONCLUSIONES

El análisis de cambio de uso del suelo en la RR, Tabasco, México, en el periodo 1947-2019, evidenció crecimiento de las superficies de cultivos, pastizales, plantaciones forestales y zonas urbanas, en un 429% en 72 años. El incremento de los usos agropecuarios contribuyó a la pérdida del 63.9 % de la vegetación, y la deforestación del 83.7% de las selvas.

Los usos agropecuarios en la RR fueron impulsados mayormente por programas gubernamentales federales como el Plan Balancán-Tenosique, a expensas de la pérdida masiva de la vegetación, lo que denota la nula consideración de factores ambientales en la planeación e implementación de dichos programas. Esta degradación converge con tendencias similares de cambio acelerado de la vegetación a usos agropecuarios y asentamientos humanos en Tabasco, México y la zona tropical mundial, lo que hace prever la merma de múltiples servicios ecosistémicos.

Para revertir la problemática generada por el cambio de uso no planificado en la RR, se requiere impulsar usos agropecuarios y forestales sostenibles considerando la capacidad de uso de los suelos y el ambiente, y utilizar la información generada en planes municipales y regionales sobre ordenamiento ecológico y territorial, para promover zonas de conservación, recuperación y manejo sustentable de la vegetación.

La aplicación del módulo Land Change Modeler en la investigación, revela que es una herramienta adecuada para generar cartografía de uso del suelo con buena clasificación y calidad, y para analizar los cambios en períodos de varias décadas en zonas agropecuarias del trópico húmedo.

CAPÍTULO II. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUELO CON MÉTODOS CONVENCIONALES, ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO CERCANO Y QUIMIOMETRÍA

2.1 RESUMEN

Se realizó una investigación retrospectiva – prospectiva, para establecer un índice de calidad de los suelos (ICS) de la Región de los Ríos (RR) en Tabasco, México y su modelación con la tecnología NIR y la quimiometría. Con la relación MO / (arcilla + limo) se estableció el ICS para evaluar los suelos Cambisoles de la RR. El porcentaje de MO y el ICS fueron comparados para definir el mejor calificador de la calidad de los suelos. Con base en el ICS, el 58 % de los suelos de la RR presentan degradación, mientras que, solo el 14 % de los suelos indican que presentan baja concentración de MO. Por lo que se concluye que el ICS es más sensible para cuantificar la degradación de los suelos cuando se comparó con la evaluación basada en la MO. Se recomienda un programa de manejo sostenible del suelo y prácticas edafológicas adaptadas a las condiciones locales, ambientales, sociales y económicas, para incrementar la MO y mejorar el ICS. Con el ICS se estableció un modelo de clasificación mediante espectroscopia de infrarrojo cercano y quimiometría. Se registraron los espectros de cada muestra de suelo y mediante interpretación quimiométrica se demostró que es posible establecer un modelo de análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) para predecir el ICS. El modelo cumple con todos los calificadores estadísticos y predice correctamente el ICS en el 100 % de los casos. Se concluye que la tecnología NIR genera información suficiente para predecir el ICS; con la ventaja de, eliminar el consumo de reactivos, no se generan residuos de laboratorio, se reduce el tiempo de análisis a minutos y no se destruye la muestra en estudio. Y solo se necesita secar, moler y tamizar las muestras de suelos para evaluar la calidad estructural de suelos.

2.2 ABSTRACT

A retrospective – prospective investigation was carried out to establish a soil quality index (SQI) of Los Ríos Region (RR) in Tabasco, México and its modeling with NIR technology

and chemometrics. With the OM / (clay + silt) relationship, the SQI was established to evaluate the Cambisol soils of the RR. The OM percentage and the SQI were compared to define the best soil quality qualifier. Based on the SQI, 58% of the soils in the RR present degradation, while only 14% of the soils indicate that they present a low concentration of OM. Therefore, it is concluded that the SQI is more sensitive to quantify soil degradation when compared to the evaluation based on the OM. A sustainable soil management program and soil practices adapted to local environmental, social and conditions are recommended to increase OM and improve SQI. With the SQI, a classification model was established using near-infrared spectroscopy and chemometrics. The spectra of each soil sample were recorded and through chemometric interpretation it was shown that it is possible to establish a partial least squares discriminant analysis model (PLS-DA) to predict the SQI. The model meets all statistical qualifiers and correctly predicts the SQI in 100% of cases. It is concluded that the NIR technology generates enough information to predict the SQI; with the advantage of eliminating the consumption of reagents, no laboratory waste, is generated, the analysis time is reduced to minutes and the sample under study is not destroyed. And it is only necessary to dry, grind and sieve the soil samples to assess the structural quality of soils.

2.3 INTRODUCCIÓN

El suelo es el recurso más explotado del planeta, impactado por el cambio de uso, mediante el crecimiento de actividades humanas como urbanización, deforestación, sobrepastoreo, labranza y prácticas agrícolas inadecuadas (Borrelli et al., 2017). Es uno de los recursos clave que sostienen la vida en la tierra, y es la base de casi todos los suministros de alimentos (Hayhoe, 2013). Su calidad es de importancia para la agricultura y es esencial para cubrir las necesidades humanas en el siglo XXI (Demattê et al., 2019). La erosión del suelo ha provocado la pérdida de este recurso en grandes magnitudes y no se están creando los mecanismos que ayuden a recuperarlo (Amundson et al., 2015). Por lo anterior, es importante conocer el estado en el que se encuentra el suelo, para garantizar que su calidad beneficie a las generaciones futuras (Mirghaed y souri, 2022).

La calidad del suelo, se define como la capacidad de un suelo para funcionar y promover la productividad de las plantas y los animales y mantener o mejorar la calidad del agua y el aire (Bünemann et al., 2018), es un concepto que ayuda a su evaluación utilizando indicadores que pueden obtenerse con enfoques cualitativos o cuantitativos (Muñoz-Rojas, 2018). Los indicadores seleccionados deben ser lo más simples posible para facilitar su aplicación e interpretación (Mukhopadhyay et al., 2014).

Las metodologías para la determinación de estos indicadores deben proporcionar resultados rápidos y con una capacidad de predicción comparable a los análisis de laboratorios convencionales o tradicionales, para que se obtengan análisis rápidos y rentables (Demattê et al., 2019; Recena et al., 2019). Para cumplir lo anterior, se tiene al espectrofotómetro de infrarrojo cercano (NIRS, siglas en inglés) y el análisis quimiométrico que se destacan por sus aplicaciones exitosas en estudio de las propiedades físicas y químicas del suelo y la evaluación de su calidad, de manera rápida, confiable y económica; lo cual facilita la toma de decisiones con respecto a su manejo y conservación (Liu et al., 2020; Gruszczyński y Gruszczyński, 2022). NIRS y quimiometría pueden utilizar el análisis de laboratorio híbrido para optimizar el estudio del suelo, con un mejor control de calidad (Demattê et al., 2019; Recena et al., 2019). Por lo tanto, se realizó la investigación con el objetivo de evaluar los suelos de la Región de los Ríos (RR) en Tabasco, México mediante un ICS generado con métodos convencionales y con este índice establecer un modelo de clasificación mediante espectroscopia de infrarrojo cercano y quimiometría. Lo cual; reducirá el tiempo de análisis a minutos y la emisión de residuos de laboratorio y sin destruir la muestra.

En México, se ha aplicado la NIRS y la Quimiometría para establecer modelos de regresión múltiple para estimar: la abundancia del C en suelos (Fuente et al., 2009), el nitrógeno total (Jarquín et al., 2011), la materia orgánica (Jarquín et al., 2012), el carbono y nitrógeno total (Fuentes et al., 2012), el carbono y el nitrógeno en suelos forestales (Esquivel-Valenzuela et al., 2018); sin embargo, no se encontraron aplicaciones de la NIRS para establecer de modelos de clasificación, o para estimar propiedades físicas y biológicas de los suelos. Y a nivel internacional son escasos los modelos de clasificación en el estudio del suelo; lo cual, da relevancia a la presente investigación.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Sitios de muestreo

El estudio se realizó con un diseño descriptivo, retrospectivo, prospectivo, transversal y no experimental (Méndez et al., 2014), en RR en Tabasco, México, que esta integrada por los municipios de Balancán, Emiliano Zapata y Tenosique, con un área de 6234.2 km² (24.7 % del estado de Tabasco); colinda al norte y oeste con los estados de Campeche y Chiapas, y al este y sur con la República de Guatemala (Figura 2.1). Prevalcen los climas cálido húmedo con lluvias abundantes todo el año (Af), al sur, cálido húmedo con lluvias abundantes en verano (Am), al centro y noroeste, y cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw), al noreste. De noreste a sur, la precipitación media anual varía de 1,600 mm a 2,000 mm, y la temperatura media anual oscila entre 26 a 28 °C (Aceves-Navarro y Rivera-Hernández, 2019). Los edafopaisajes corresponden a terrazas costeras con Luvisoles, Lixisoles y Cambisoles; terrazas y montañas Kársticas con Leptosoles, Cambisoles y Vertisoles; y planicies fluviales con Gleysoles y Fluvisoles (Salgado-García et al., 2017).

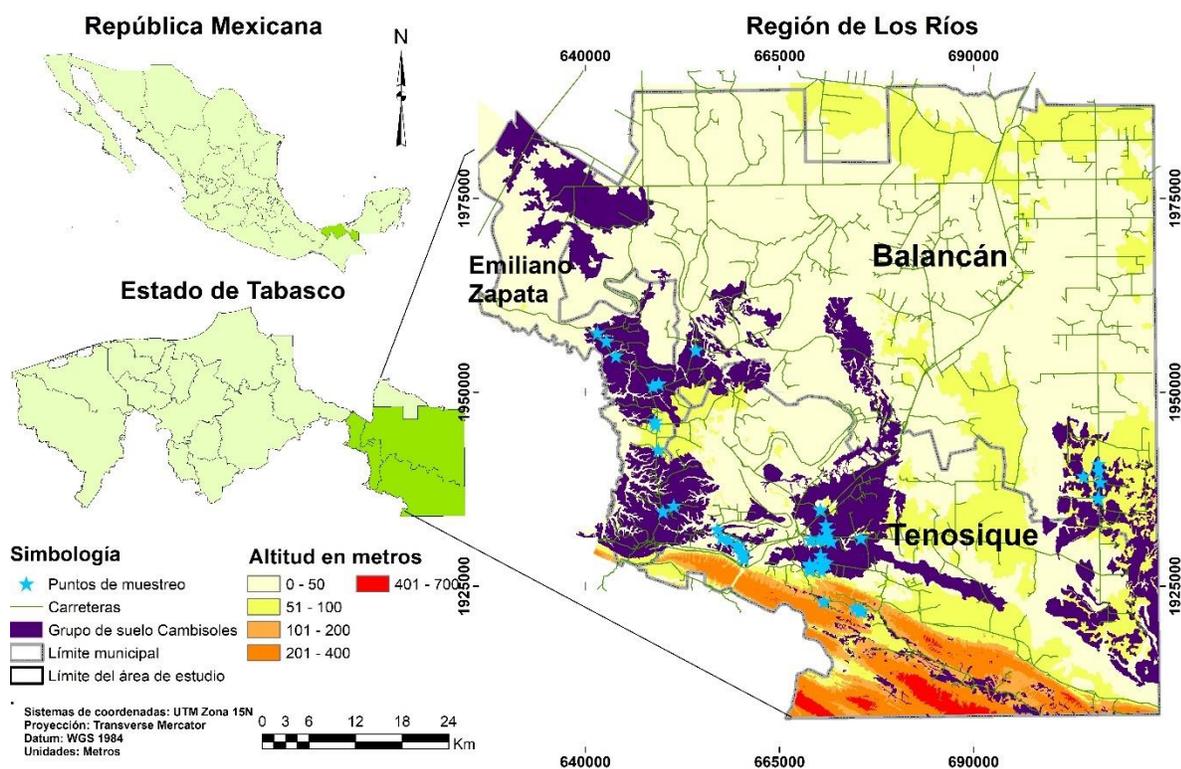


Figura 2.1 Ubicación geográfica del área de estudio y la distribución de los puntos de muestreo de los suelos de la Región de Los Ríos, Tabasco, México.

2.4.2 Muestreo de suelos

Se seleccionó el tipo de suelo Cambisol por ocupar la mayor superficie con usos agropecuarios en la RR de acuerdo con el mapa de suelo publicado por Salgado-García et al. (2017), Figura 1. Posteriormente mediante superposición con un mapa de cambio de uso de suelo (Ramírez-García et al., 2022), se seleccionaron 48 sitios de muestreo, de 2 ha cada uno de ellos, en cuatro tipos de usos: agricultura temporal (maíz, frijol, calabaza, etc.), agricultura anual (caña de azúcar), pastizal (ganadería extensiva) y vegetación secundaria, cada tipo de uso con tres tiempos de establecimiento: 1984, 2000, 2019.

En cada sitio, el muestreo se realizó mediante un recorrido con un diseño probabilístico sistemático en dos direcciones semi-alineado en zigzag. Para la toma de muestras de suelo se utilizó una barrena tipo holandesa, a una profundidad de muestreo de 30 cm y los puntos de muestreo se registraron con el sistema de posicionamiento global (navegador portátil) GPSMAP 64s[®] con su antena de cuatro hélices y su receptor GPS y GLONASS de alta sensibilidad, con una precisión ± 1 m. Para la obtención de las muestras, se tomaron 15 submuestras, para formar con ellas una muestra compuesta, por sitio de muestreo, y se redujo el tamaño de muestra mediante cuarteo, para obtener un (1) kg, aproximadamente (Rodríguez y Burguete, 1987). Las muestras de suelo se conservaron en bolsas de plástico (calibre 200 micras, de 26.8 x 27.3 cm, resellable) para su traslado inmediato al laboratorio, para su posterior análisis.

2.4.3 Análisis de los suelos y obtención de espectros VIS-NIR-SWIR

Las muestras de suelo recolectadas se secaron al aire y a temperatura ambiente. Se molieron y se tamizaron a través de una malla número 10 (2 mm) para la determinación de la granulometría con el método AS-09 (Bouyoucos), de la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002); y con una malla 35 (0.5 mm) para el análisis de materia orgánica (MO) o carbono oxidable (COX) con el método AS-07 de Walkley – Black (SEMARNAT, 2002).

Los espectros NIRS se obtuvieron con un espectrofotómetro marca Foss (modelo Versatile Agri Analyzer 6500 System II Vertical Type 461008). El equipo tiene detectores de silicio (400 a 1100 nm) y PbS (1100 a 2500 nm), que registran la cantidad de luz reflejada y/o transmitida, para transformarla en una señal que se registra mediante el programa ISIScan versión 2.81 del 2008 (de la empresa *Infrasoft International LLC. State College, PA USA*). Cuenta a una computadora (Acer AMD Sempron™ Processor 3200+ 1.81 GHz, 448 MB de RAM). El espectrofotómetro este acoplado a una computadora Acer AMD Sempron™ con Procesador 3200+ 1.81 GHz, con 448 MB de RAM). Se colocaron 50 g de suelo en una celda porta muestra de cuarzo de 24 cm³. El espectrofotómetro se programó en el rango espectral de 400 a 2498 nanómetros (nm), con intervalos de muestreo de 2 nm, lo que produce un espectro de 1050 datos.

2.4.4 Clasificación del contenido de materia orgánica en los suelos

La MO de los suelos de la RR, fue cuantificada y clasificada con el método AS-07 (Walkley-Black) establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Así mismo, la granulometría de los suelos fue cuantificada con el método AS-09 establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Los resultados de los análisis de suelos se utilizaron para generar el índice de calidad de los suelos en la RR aplicando la fórmula indicada en Fernández (2014):

$$ICS = \frac{MO}{(R + L)} \times 100$$

Donde:

ICS = Índice de calidad del suelo

MO= Materia orgánica

R+L= suma del porcentaje de arcilla y limo, respectivamente.

Para la interpretación del índice de calidad de suelo se utilizó la clasificación indicada en Fernández (2014), la cual se basa en cuatro categorías: 1) suelo degradado, 2) suelo con alto riesgo de degradación física, 3) moderado riesgo a la degradación y 4) estructuralmente estable.

2.4.5 Modelo de clasificación del índice de calidad de suelo mediante la tecnología NIRS

Con los espectros VIS-NIR-SWIR y los datos del ICS se realizó la modelación de análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA, por sus siglas en inglés). La técnica se propone por su capacidad para generar patrones de reconocimiento basado en el método de regresión. Donde, las clases del ICS funcionan como vectores para desarrollar el modelo de predicción de una propiedad de interés, y es lo que permite generar grupos de individuos por clases (Brereton y Lloyd, 2014).

La validación del modelo de clasificación del suelo se realizó en dos etapas. En la primera, con un grupo de entrenamiento constituido por el 90 % de las muestras de suelo, y en la segunda con un grupo de validación externa formado por el 10 % restante de muestras de suelo. Las muestras de cada grupo fueron asignadas aleatoriamente (Lopo *et al.*, 2018; Gozukara *et al.*, 2022).

En la construcción del modelo se utilizaron técnicas de preprocesado y transformaciones, como lo propone Perret *et al.* (2020), integradas en el software de quimiometría Pirouette® versión 4.11 de Infrometrix, como lo indican Castro *et al.* (2020). Para la evaluación (interna y externa) del modelo, se utilizaron el coeficiente de determinación en la calibración (R^2), suma de cuadrado del error residual de predicción (PRESS), el error estándar de calibración (SEC) y el porcentaje del error promedio (PERCENT).

El resultado del modelo de clasificación PLS-DA es un diagrama de dispersión en el que cada muestra se clasifica en una de las clases predeterminadas (ICS) y una evaluación estadística de diferencias significativas entre clases (Brereton y Lloyd, 2014; Levi *et al.*, 2020).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos de la RR se clasificaron en siete clases texturales (Figura 2.2). Los resultados son consistentes con lo reportado por López-Castañeda *et al.* (2017) para los suelos arcillosos.

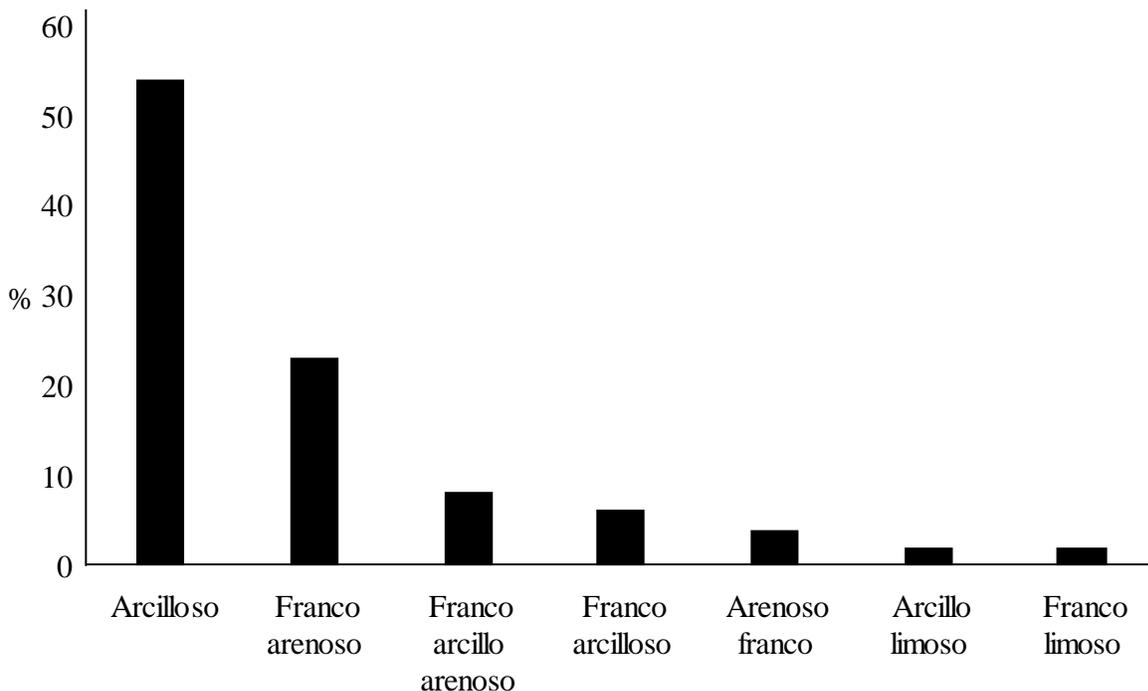


Figura 2.2 Porcentaje de muestras en las siete clases texturales identificadas en el estudio de los suelos de la Región de Los Ríos, Tabasco, México.

En cultivos temporales, los suelos arcillosos son dominantes (6 de 12); en cultivos anuales, los arcillosos también domina con 11 de los 12 sitios muestreados; en pastizales se encontraron 4 de los 12 sitios y en vegetación secundaria se presentan en 5 sitios de los 12 similar a lo encontrado por Geissen et al. (2009), donde señalan que los suelos con caña de azúcar y agricultura de temporal mostraron contenidos de arcilla significativamente mayor.

2.5.1 Materia orgánica e índice de calidad de los suelos de la RR de Tabasco

El contenido de MO muy alto y alto se encuentra en suelos con uso continuo, desde 1984, de vegetación secundaria y pastizales. Contrastando con los suelos utilizados con cultivos de temporal y anual que muestran un nivel de bajo a medio. Con base en las clases de MO establecidas en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), el 10 % de los suelos de RR pertenecen a la clase muy alta, un 54 % a la clase alto, el 21 % a la clase media y el 2 % a la clase baja (Cuadro 1). Dorji et al. (2015) mencionan que las diferencias en el contenido de carbono orgánico del suelo son atribuidas al tipo de

cubierta vegetal, así como al tipo de textura (Imbellone *et al.*, 2010). De acuerdo con Imbellone *et al.* (2010), al aumentar el material fino (arcilla+limo), el MO queda protegido por la formación de complejos órgano-minerales y el efecto de la textura sobre la MO se relaciona con la cantidad, distribución de fracciones y calidad. Por lo que se, deduce que la estructura del suelo influye en el almacenamiento del MO (Ramírez *et al.*, 2008).

Con base en el índice de calidad de suelo (ICS) y la calificación de Fernández *et al.* (2016), el 58 % de los suelos de la RR presentan degradación, donde el 29 % de los suelos pertenecen a la clase 1, calificado como degradado; otro 29 % corresponde a la clase 2, que presenta alto riesgo de degradación física; el 21% de las muestras analizadas corresponde a la clase 3, considerada como moderado riesgo a la degradación y el 21 % de los suelos restantes corresponden a la clase 4, que significa que son suelos estables estructuralmente.

De acuerdo con Gozukara *et al.* (2022) la MO es el indicador más utilizado en la evaluación de la calidad del suelo. Pero con los resultados obtenidos se deduce que el ICS es más sensible para identificar suelos con problemas de degradación, cuando se compara con los resultados obtenidos contra clases definidas en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Con el ICS se identifican un número mayor de suelos degradados y con alto riesgo de degradación física (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1 Muestras clasificadas con el índice de calidad de suelo y la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

| Índice de calidad | Numero de muestras (ICS) | Clases de MO según SEMARNAT (2002) | Número de muestras clasificadas con la SEMARNAT, 2002 |
|--------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|---|
| 1.-Degradado | 14 | Muy bajo | 0 |
| 2.-Alto riesgo de degradación física | 14 | Bajo | 7 |

| | | | |
|-------------------------------------|----|----------|----|
| 3.-Moderado riesgo a la degradación | 10 | Medio | 10 |
| 4.-Estructuralmente estable | 10 | Alto | 26 |
| | | Muy alto | 5 |
| Total | 48 | | 48 |

En el suelo Cambisol, para las clases 1 y 2 del ICS, se recomienda un programa de manejo sostenible del suelo y prácticas edafológicas adaptadas a las condiciones locales, ambientales, sociales y económicas, para incrementar la MO y mejorar el ICS como se recomiendan a nivel mundial (Bünemann et al., 2018). Los suelos que corresponden a la clase 3, deben ser atendidos para detener o disminuir el proceso de degradación física con prácticas de restauración ecológica basada en la mejora de las propiedades del suelo y el aumento de la cubierta vegetal para la recuperación de la productividad y la sostenibilidad (Bai et al., 2020). Finalmente, los suelos que corresponden a la clase 4, se mantienen estables estructuralmente (Fernández et al., 2014) pero se requiere conservar la cubierta vegetal para evitar su degradación.

2.5.2 Modelo de clasificación del índice de calidad de suelo mediante la tecnología NIRS y la qimiometría

Para generar estos índices es necesario realizar el análisis de la granulometría y la MO con métodos convencionales establecidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002); estos análisis requieren horas para su ejecución, reactivos, personal y generan residuos de laboratorio (Levi et al., 2020); además de que destruyen la muestra.

La tecnología NIRS es una alternativa a los métodos convencionales en el análisis de suelos. Por lo cual, se planteó esta investigación como una alternativa para predecir el ICS en minutos, sin destruir la muestra y sin generar residuos de laboratorio.

En la Figura 2.3 se muestran los 48 espectros NIRS de los suelos, uno por cada muestra. Los resultados se presentan en unidades de absorbancia ($A = \log_{10} (1/\text{Reflectancia})$), de acuerdo con Liu et al. (2020), es una alternativa para mejorar la linealidad de los espectros.

Con los valores del índice de Calidad (Cuadro 2.1) y los espectros VIS-NIR-SWIR (Figura 2.3) se obtuvo un modelo clasificatorio-discriminante de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA).

Para establecer el modelo PLS-DA se utilizaron transformaciones de segunda y primera derivada, y logaritmo base 10, transformaciones similares a utilizo Nespeca et al. (2018). Las transformaciones aumentan la covarianza de los datos espectrales con las clases del ICS por lo que es un modelo de clasificación confiable para predicciones (Levi et al., 2020).

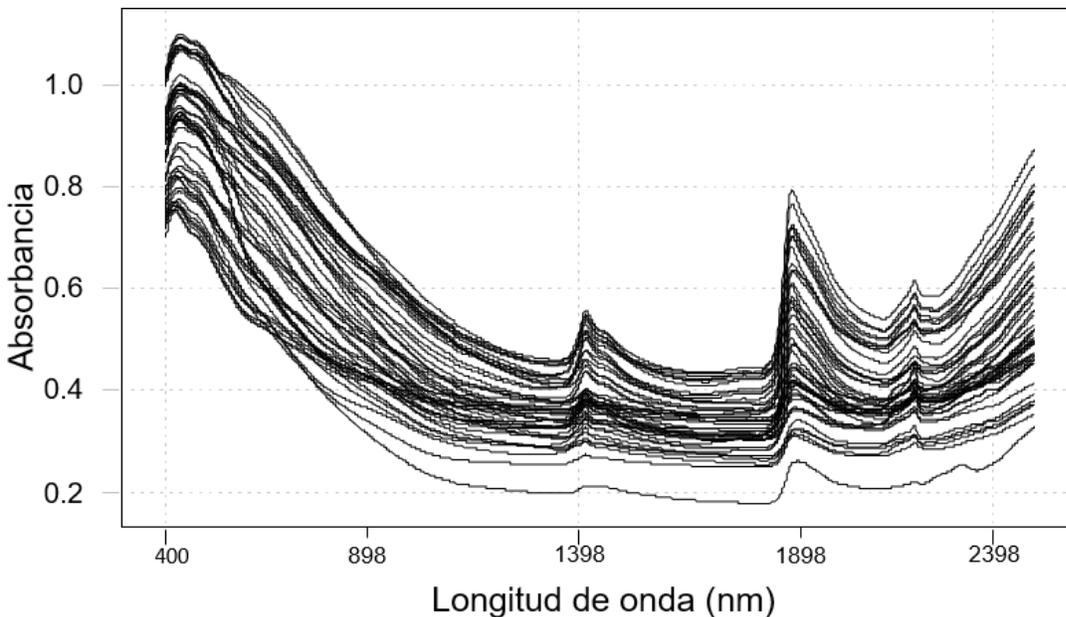


Figura 2.3 Espectros VIS-NIR-SWIR de las muestras de suelos de la Región de los Ríos de Tabasco, México.

Con el modelo de clasificación PLS-DA se obtuvo un 100 % de las variables correlacionadas, para los suelos Cambisoles incluidos de este estudio, similar a lo obtenido por Soares et al. (2017). Para la extrapolación del modelo, a otras regiones, deben incluirse espectros que integren la variabilidad de los suelos, para una mejor

predicción. Las 48 muestras fueron debidamente clasificadas conforme al ICS obteniendo mejores resultados estadísticos que los reportados por Levi et al. (2020); y resultados del R^2 mayores a 0.90; que es similar a los obtenidos por Lopo *et al.* (2018). En el grupo de entrenamiento se obtuvieron valores de RMSE bajos y coeficientes de determinación altos (cercanos a 1) (Cuadro 2.2). Mientras que, en la validación externa con el 10 % de las muestras seleccionadas se obtuvo el 100 % de las predicciones de las clases, lo que confirman la robustez y confiabilidad del modelo como lo recomiendan Javadi et al. (2021). La sensibilidad y la selectividad indican que el modelo clasificó correctamente todas las muestras (clases contra predicción Cuadro 2.2). Por tanto, el modelo PLS-DA clasificó correctamente el 100 % de las muestras de calibración y de validación. Con este tipo de modelo es posible predecir los valores tanto para los datos originales (autopredicción) como para muestras futuras de orígenes desconocidos, o muestras de pruebas de orígenes conocidos (Brereton y Lloyd, 2014).

El grupo de entrenamiento y el de validación externa presentaron coeficientes de determinación altos (Cuadro 2.2), los cuales son buenos, de acuerdo con Soares et al. (2017). Las predicciones de las muestras obtuvieron valores de SEC bajos y coeficientes de determinación en la calibración alto, por lo que la discriminación entre las muestras y clases presentan buen ajuste y, por lo tanto, mayor confiabilidad analítica (Demattê et al., 2019). Resultados similares (alta correlación) fueron obtenidos por Nespeca *et al.* (2018) cuando utilizaron PLS-DA para clasificar muestras de suelo contaminados por hidrocarburos.

Cuadro 2.2 Resultados de las métricas para evaluar la calidad de las predicciones del PLS-DA con el ICS.

| Clases | Predicción 1 | Predicción 2 | Predicción 3 | Predicción 4 | No coinciden |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Clase 1 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Clase 2 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 |
| Clase 3 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|--|-------|---|---|----|---|
| Clase 4 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 |
| R ² | 0.99 | | | | |
| PRESS | 0.024 | | | | |
| SEC | 0.024 | | | | |
| PERCENT | 0.005 | | | | |
| SEC de la calibración interna del 90% | 0.024 | | | | |
| SEC de la validación externa del 10% | 0.024 | | | | |

R² = coeficiente de determinación en la calibración, PRESS = suma de cuadrado del error residual de predicción, SEC = error estándar de calibración y PERCENT = porcentaje del error promedio.

Las predicciones del modelo PLS-DA, son iguales a los generados con el ICS del método convencional (COX / (arcilla+lino)). Con la ventaja de ser más rápido y económico, sin consumo de reactivos, sin emisión de residuos de laboratorio y no destructivo. Solo se realizó un proceso de secado y molido de la muestra de suelo (Levi et al., 2020).

Con los espectros NIR, los datos de ICS y la quimiometría, es posible generar modelos PLS-DA para identificar suelos que se encuentren degradados (clase 1), con alto riesgo de degradación física (clase 2), moderado riesgo a la degradación (clase 3) o estructuralmente estable (clase 4) (Figura 2.4). Los resultados del modelo PLS-DA corroboran que con los espectros VIS-NIR-SWIR es posible clasificar satisfactoriamente los tipos de suelo dentro de una región geográfica conocida (Lopo et al., 2018). Esto

demuestra que la calidad del suelo se puede diagnosticar con la espectroscopia de infrarrojo cercano. Al respecto, Levi et al. (2020) indican que un método integral con modelos matemáticos puede tener resultados aplicables, tal como sucede con las muestras de suelos de la RR. Siempre que presenten características similares en cuanto a granulometría y porcentajes de carbono orgánico para predecir los índices de calidad de suelo (Gozukara et al., 2022). Con el análisis espectral de muestras de suelo es posible generar modelos de clasificación PLS-DA como un método confiable, rápido y accesible para evaluar la calidad del recurso. Lo anterior es posible debido a las diferencias espectrales de las muestras de suelo (Perret et al., 2020).

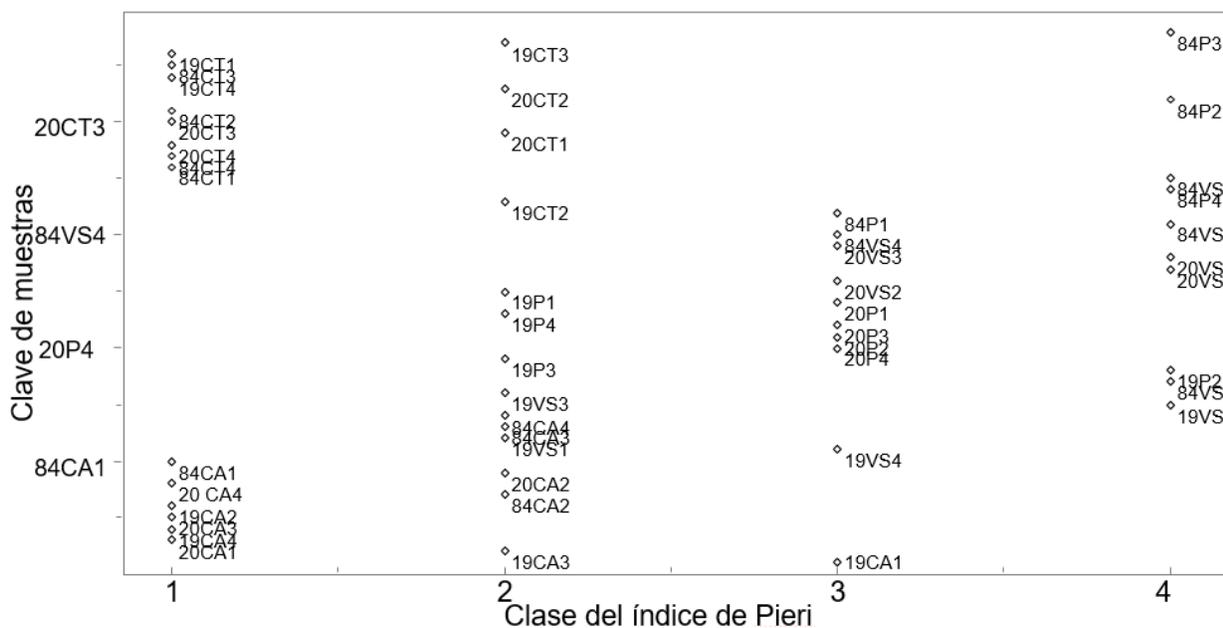


Figura 2.4 Grupos por clases del ICS para las muestras tomadas en la Región de Los Ríos, Tabasco, México.

2.6 CONCLUSIONES

Con la relación MO / (arcilla + limo) fue posible establecer un índice de calidad de suelo (ICS) con el cual evaluar los suelos Cambisoles de la Región de los Ríos en el estado de Tabasco, México. El porcentaje de MO y el ICS fueron comparados para definir el mejor calificador de la calidad de los suelos. Con base en el ICS, el 58 % de los suelos de la

RR presentan degradación, mientras que, solo el 14 % de los suelos indica que presentan baja concentración de MO. Por lo que se concluye que el ICS es más sensible para cuantificar la degradación de los suelos cuando se comparó con la evaluación basada en la MO. Se recomienda un programa de manejo sostenible del suelo y prácticas edafológicas adaptadas a las condiciones locales, ambientales, sociales y económicas, para incrementar el COX y mejorar el ICS. Con el ICS se estableció un modelo de clasificación mediante espectroscopia de infrarrojo cercano y quimiometría. Se registraron los espectros de cada muestra de suelo y mediante interpretación quimiométrica se demostró que es posible establecer un modelo de análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) para predecir el ICS. El modelo cumple con todos los calificadores estadísticos y logra predecir correctamente el ICS en el 100 % de los casos. Se concluye que la tecnología NIR genera información suficiente para predecir el ICS; con la ventaja de reducir el tiempo de análisis a minutos, eliminar el consumo de reactivos, no se generan residuos de laboratorio, y no se destruye la muestra en estudio. Y solo se necesita secar, moler y tamizar las muestras de suelos para evaluar la calidad estructural de suelos.

CAPÍTULO III. CALIDAD DE UN CAMBISOL CON DIFERENTE TIEMPO DE USO AGROPECUARIO EN LA REGIÓN LOS RÍOS, TABASCO, MÉXICO

3.1 RESUMEN

El objetivo de la investigación consistió en evaluar la calidad de un suelo Cambisol con diferente tiempo de uso agropecuario en la región de Los Ríos (RR), Tabasco, México. Se seleccionaron cuatro usos agropecuarios en un Cambisol (CM): cultivo de temporal (CT), cultivo anual (CA), pastizal (Pa) y vegetación secundaria (VS), establecidos en tres tiempos (1984, 2000 y 2019), con cuatro repeticiones. Se colectó suelo con barrena a 0-30 cm de profundidad. Se determinaron las propiedades fisicoquímicas del suelo: textura (T), densidad aparente (DA), estabilidad de los agregados (EA), pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), nitrógeno total (N), fósforo (P) y potasio (K). Se realizó un análisis de varianza del experimento factorial (nivel de significancia $p=0.05$), a las variables que presentaron efecto estadísticamente significativo se les hizo la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey (nivel de significancia $p=0.05$). Se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas ($p\leq 0.05$) en los contenidos de MO, P, K y DA. El alto contenido de MO en los CM con VS en todos los años, evidencia mejor calidad de suelo en comparación con CM con CT y CA. La DA alta registrada en CM con Pa desde 1984, indica degradación de la calidad del suelo por compactación, a consecuencia del pastoreo por la ganadería extensiva. Se requieren implementar prácticas de manejo sustentables para recuperar los CM degradados. Los contenidos de MO y DA fueron los mejores indicadores de calidad del suelo CM afectado por el cambio de uso agropecuario y tiempo de uso en la RR, Tabasco.

3.1 ABSTRACT

The objective of the research was to evaluate the quality of a Cambisol soil with different times of agricultural use in the Los Ríos (RR) region, Tabasco, Mexico. Four agricultural uses were selected in a Cambisol (CM): rainfed crop (CT), annual crop (CA), pasture (Pa) and secondary vegetation (VS), established in three times (1984, 2000 and 2019), with

four repetitions. Soil was collected with an auger at a depth of 0-30 cm. The physicochemical properties of the soil were determined: texture (T), apparent density (DA), stability of the aggregates (EA), pH, electrical conductivity (EC), organic matter (OM), total nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K). An analysis of variance of the factorial experiment was performed (significance level $p=0.05$), the variables that presented a statistically significant effect were subjected to Tukey's multiple comparison of means test (significance level $p=0.05$). Statistically significant differences ($p\leq 0.05$) were obtained in the contents of MO, P, K and DA. The high OM content in the CM with VS in all years, shows better soil quality compared to CM with CT and CA. The high DA registered in CM with Pa since 1984 indicates degradation of soil quality due to compaction, because of grazing by extensive livestock. Sustainable management practices must be implemented to recover degraded CM. The OM and DA contents were the best quality indicators of the CM soil affected by the change in agricultural use and time of use in the RR, Tabasco.

3.3 INTRODUCCIÓN

La calidad del suelo se define como la capacidad que tiene para funcionar y promover la sostenibilidad de las plantas, los animales y los seres humanos, y mantener o mejorar la calidad del agua, el aire y el medio ambiente (Bünemann et al., 2018). El anterior es un concepto funcional que permite evaluar el recurso suelo utilizando indicadores cualitativos y cuantitativos (Pouladi et al., 2020). Los indicadores integran información sobre propiedades y características del suelo que evalúan la respuesta de la productividad o funcionalidad del suelo, e indican si la calidad del suelo mejora, permanece o disminuye (Schloter et al., 2018).

Los estudios sobre calidad son necesarios, en razón que el suelo es un recurso fundamental para la creación de bienes y servicios para los ecosistemas y el bienestar de la sociedad (Bünemann et al., 2018), en particular para satisfacer necesidades sobre seguridad alimentaria, hídrica y energética (FAO y ITPS, 2015). En contraposición a lo anterior, los suelos han estado sometidos a procesos de degradación, mayormente por erosión, con disminución de la salud del suelo y rendimiento de cultivos, como

consecuencia de la sustitución de la vegetación natural por usos agropecuarios (Jian et al., 2020), y la implementación de usos del suelo y prácticas insostenibles, lo que ha conducido a la infertilidad de un tercio de los suelos del mundo (FAO y ITPS, 2015). La degradación del suelo y la merma en su calidad, amenaza el futuro de las sociedades humanas y el logro de objetivos de desarrollo sostenible que garanticen el bienestar de las personas y el medio ambiente (Keesstra et al., 2016). En México, 52.9 % del territorio presenta degradación de suelos, y en Tabasco 70% de la entidad evidencia degradación asociada a usos agropecuarios insustentables (Ortiz-Solorio et al., 2011), con cambios en propiedades físicas, químicas y de calidad de suelo (Geissen et al., 2009). El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad físico y química del suelo Cambisol con uso agropecuario, con diferentes tiempos de establecimiento de prácticas agrícolas en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Área de estudio

El estudio se realizó en la región de Los Ríos (RR), en los municipios de Balancán, Emiliano Zapata y Tenosique, ubicada al este del estado de Tabasco, en una superficie de 6234.2 km² (24.7 % de la entidad). Colinda al norte y oeste con los estados de Campeche y Chiapas, y al este y sur con la República de Guatemala (Figura 3.1). De norte a sur, prevalecen los climas cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw2), cálido húmedo con lluvias abundantes en verano (Am(f)), y cálido húmedo con lluvias abundantes todo el año (Af(m)); la precipitación media anual varía de 1600 a 2000 mm, y la temperatura media anual oscila entre 26 y 28 °C (Aceves-Navarro y Rivera-Hernández, 2019). El suelo Cambisol (CM) destaca en planicies aluviales y lomeríos de areniscas, lutitas y calizas, en el 14 % de la RR (Figura 1); sostiene pastizales para la ganadería bovina, cultivos de temporal y anuales, plantaciones forestales, palma de aceite y vegetación secundaria (Salgado-García et al., 2017).

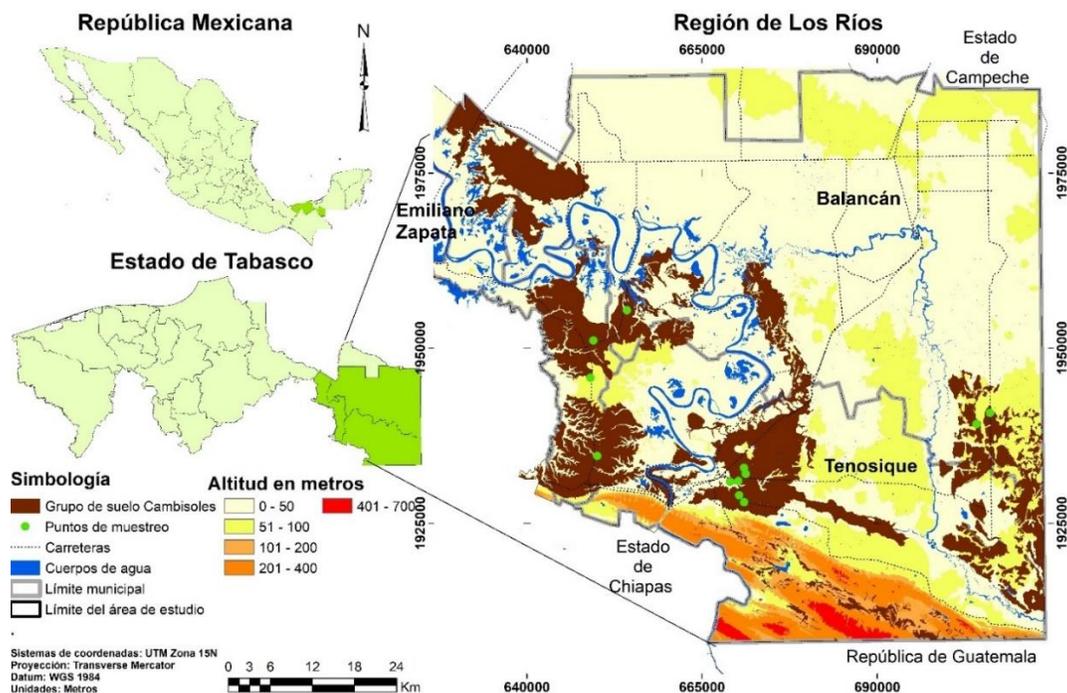


Figura 3.1 Localización de la región de Los Ríos, Estado de Tabasco, México.

3.4.2 Selección de usos agropecuarios en Cambisoles

En suelos CM (Salgado-García et al., 2017), y con base en la cartografía sobre usos del suelo generada por Ramírez-García et al. (2022), se seleccionaron cuatro usos del suelo con tres tiempos de inicio de establecimiento (1984, 2000 y 2019): a) cultivos de temporal (CT), de maíz, frijol, calabaza y sandía; b) cultivo anual (CA), representado por caña de azúcar; c) pastizal (Pa), y d) vegetación secundaria (VS).

3.4.3 Muestreo de suelos

En cada uso del suelo, considerando los tres tiempos de inicio de su establecimiento, se seleccionaron cuatro sitios para el muestreo a fin de estimar su calidad. En cada sitio se obtuvo una muestra compuesta de 15 submuestras a una profundidad de 0 a 30 cm, en una superficie de 400 m², siguiendo un diseño de recorrido en zig zag; se homogeneizó la muestra y se separó 1 kg de suelo. Para determinar densidad aparente (DA) se colectó suelo inalterado con una barrena cilíndrica, por debajo de los 10 cm de la capa superficial.

3.4.4 Análisis de laboratorio

En el Laboratorio Agroindustrial, Suelo, Planta y Agua (LASPA), del Campus Tabasco, las muestras de suelo fueron secadas al aire libre, a temperatura ambiente. Para realizar los análisis físicos y químicos se trituraron, homogeneizaron y se pasaron por un tamiz de 2 mm, y por tamiz de 0.5 mm para los análisis de materia orgánica (MO) y nitrógeno total (NT). Las muestras de suelo para determinar DA, fueron secadas en horno a 105 °C y pesadas en seco, el cálculo se realizó con la fórmula propuesta por USDA (1999). La estabilidad de agregados (EA), se determinó por método de agitación en seco (Eynard, 2004). Los análisis de: materia orgánica (MO) (Walkley y Black), nitrógeno total (NT) (Semimicro Kjeldahl), fósforo (P) (Olsen), potasio (K) (extracción con acetato de amonio 1 N, pH 7 y cuantificación por absorción atómica), textura (método de hidrómetro de Bouyoucos), pH (2:1) y conductividad eléctrica (CE) (1:5) se basaron en la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

3.4.5 Análisis estadístico

Se generó una base de datos de las propiedades físicas y químicas del suelo usadas como indicadores de su calidad, en cuatro usos: CT, CA, Pa y VS, con tres tiempos de establecimiento (1984, 2000 y 2019), y cuatro repeticiones. Los usos del suelo y los tiempos de establecimiento se consideraron como factores (CT, CA, Pa y VS) y tres niveles (1984, 2000 y 2019), respectivamente, y se realizó el análisis de varianza del experimento factorial considerando a las propiedades físicas y químicas del suelo CM como variables de respuesta con un nivel de significancia $p=0.05$.

Se verificaron los supuestos de normalidad de los valores de las propiedades físicas y químicas con la prueba de Shapiro-Wilk sobre los residuos y de Levene para homocedasticidad sobre residuos absolutos (Tassano et al., 2021). Para lograr que se cumplieran estos supuestos en las variables (pH, CE, MO, N, P, K, DA y EA), se realizaron transformaciones de la raíz cuadrada, potencia, logarítmica y transformación de Johnson con el software minitab v. 20.7 (Yañez-Vazquez et al., 2018). A las variables que presentaron efecto significativo de alguno de los factores o de su interacción, se les hizo la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey (Ajayi et al., 2021). Se

analizaron los usos del suelo por año de establecimiento, y posteriormente todos los usos en diferentes años. Los análisis estadísticos se procesaron con el paquete estadístico Infostat 2017.1.2 (Tassano et al., 2021).

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1 Calidad del Cambisol entre usos agropecuarios con diferentes años de uso

El análisis factorial para determinar las propiedades físicas y químicas que influyen en la calidad del CM con usos agropecuarios en distinto tiempo de establecimiento (años de uso), mostró diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) en el contenido de MO (Cuadro 3). Los mayores contenidos de MO se observaron en VS en los tres tiempos de establecimiento (1984, 2000, 2019) (Cuadro 3.1), lo que se atribuye a la descomposición de la hojarasca y residuos de las raíces por los microorganismos, que favorece el aumento de la MO (Alabi et al., 2019). En contraste, en 2019 en CT se presentaron valores muy bajos de MO, debido a las prácticas de labranza continua que reducen rápidamente la MO del suelo (Wang *et al.*, 2021). Cabe señalar que el CM de la RR, presentó niveles medios a altos de MO (2-6 %) en sus diversos usos del suelo (SEMARNAT, 2002).

El K presentó las mayores concentraciones en CT del 2000, lo que se puede atribuir a la aplicación de fertilizantes (Alabi et al., 2019), Pa y VS en 1984 mostraron los valores más bajos. El CM con los usos estudiados mostro valores bajos de K (<0.3 (cmol(+)) kg^{-1}) (SEMARNAT, 2002).

En cuanto a los porcentajes granulométricos, la arena y en menor grado la arcilla, mostraron diferencias estadísticamente significativas en los diferentes usos y años. Los cambios en la textura del suelo obedecen a la mineralogía del material parental y el grado de meteorización, ya que es una propiedad inherente al suelo y está controlada por procesos de formación (Mulat et al., 2021); lo anterior se confirma por las rocas de edad variable en que se desarrolla el CM de la RR como aluviones del Holoceno, sedimentos detríticos del Mioceno, y calizas y margas del Eoceno (Salgado-García et al., 2017).

Cuadro 3.1 Valores medios de los indicadores de calidad del CM entre usos del suelo con diferentes tiempos de establecimiento (años de uso) en la RR.

| Año | Uso | pH | CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$) | MO (%) | N (%) | P (mg kg ⁻¹) | K (cmol(+) kg ⁻¹) | DA (g cm ³) | EA (DMP) | R (%) | L (%) | A (%) |
|------|-----|------|---------------------------------|-----------|----------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------|----------|----------|----------|
| 1984 | CT | 6.8a | 85.5a | 2.5ab | 0.1a | 40.4a | 0.3ab | 1.2a | 1.4a | 36.1abc | 31.8a | 32.1ab |
| 2000 | CT | 6.7a | 89.6a | 3.8ab | 0.2a | 35.0a | 0.65a | 1.1a | 0.7a | 62.3a | 16.9a | 20.8ab |
| 2019 | CT | 6.1a | 48.4a | 1.7b | 0.3a | 37.8a | 0.35ab | 1.4a | 0.8a | 20.6bc | 14.9a | 64.4a |
| 1984 | CA | 6.4a | 71.0a | 3.2ab | 0.2a | 30.4a | 0.3ab | 1.1a | 0.8a | 45.5abc | 20.4a | 34.1ab |
| 2000 | CA | 7.0a | 80.1a | 2.5ab | 0.2a | 32.3a | 0.33ab | 1.3a | 1.6a | 51.3ab | 21.4a | 27.3ab |
| 2019 | CA | 7.3a | 107.1a | 4.1ab | 0.3a | 27.3a | 0.43ab | 1.1a | 1.4a | 53.5ab | 30.4a | 16.1b |
| 1984 | Pa | 6.1a | 60.5a | 2.9ab | 0.2a | 77.9a | 0.18b | 1.4a | 0.5a | 22.3abc | 9.3a | 68.4a |
| 2000 | Pa | 7.1a | 76.8a | 3.9ab | 0.3a | 26.7a | 0.23ab | 1.4a | 0.7a | 27.3bc | 26.8a | 45.9ab |
| 2019 | Pa | 7.1a | 122.3a | 5.3ab | 0.3a | 46.5a | 0.38ab | 1.1a | 0.6a | 52.1ab | 19.4a | 28.4ab |
| 1984 | VS | 6.6a | 86.4a | 6.5a | 0.3a | 57.0a | 0.2b | 1.2a | 0.9a | 26.5abc | 16.8a | 56.7a |
| 2000 | VS | 6.2a | 60.2a | 4.6ab | 0.2a | 60.2a | 0.25ab | 1.2a | 1.1a | 15.1c | 10.8a | 74.1a |
| 2019 | VS | 6.5a | 96.4a | 5.6ab | 0.3a | 56.3a | 0.35ab | 1.0a | 1.3a | 58.6a | 17.4a | 24.0ab |

Nota: DMP= diámetro medio ponderado. Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Las propiedades que no mostraron diferencias significativas entre los factores de uso y año de establecimiento fueron: pH, con prevalencia de neutro sobre moderadamente ácido (7.3 a 6.1) (SEMARNAT, 2002), los pH ácidos en suelos con agricultura se deben al cultivo intensivo y al uso continuo de fertilizantes inorgánicos formadores de ácidos (Mulat et al. (2021)); la CE, presentó valores bajos, característicos de los CM (Salgado-

García et al., 2017), esta propiedad ayuda a los cultivos a aprovechar mejor otros nutrientes del suelo (Navarro-García y Navarro-García, 2013); el N mostró valores bajos, sobre todo en CT y CA, en estrecha relación con valores bajos a medios en MO, lo que reduce el nivel de mineralización del N (Alabi et al., 2019); el P tuvo valores altos debido a la excreta del ganado y fertilizantes aplicados (Ramírez-Iglesias et al., 2017); la DA fue mayor en Pa, asociada a compactación generada por la ganadería extensiva (Xu et al., 2021); la EA, con DMP bajos en CT y Pa, indican pérdida en la estabilidad estructural, y el aumento en CA se relaciona con el contenido de MO, al adherirse a las partículas minerales del suelo forman uniones arcillometal-húmicas que aumentan la estabilidad estructural (De Freitas et al., 2018).

3.5.2 Calidad del Cambisol entre usos agropecuarios

Al analizar el factor tipo de uso del suelo en el CM, se observaron diferencias estadísticas significativas en contenidos de MO (Cuadro 3.2). El más alto se registró en VS y el menor en CT y CA, estos últimos coinciden con registros bajos en suelos cultivados, en comparación con suelos con pastizales y abandonados (Alabi et al., 2019; Wang et al., 2021); la labranza del suelo aumenta la susceptibilidad a la erosión y la pérdida de MO (Jin et al., 2021).

Cuadro 3.2 Valores medios de los indicadores de calidad del CM entre usos del suelo en la RR.

| Uso | PH | CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$) | MO (%) | N (%) | P (mg kg^{-1}) | K ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$) | DA (g cm^3) | EA (DMP) |
|-----|------|---------------------------------|-----------|----------|------------------------------|--|---------------------------|-------------|
| CT | 6.5a | 74.5a | 2.7b | 0.2a | 37.8a | 0.43a | 1.2a | 1.0a |
| CA | 6.9a | 86.0a | 3.3b | 0.2a | 30.0a | 0.35a | 1.2a | 1.2a |
| Pa | 6.7a | 86.6a | 4.0ab | 0.3a | 50.4a | 0.26a | 1.3a | 0.6a |
| VS | 6.4a | 81.0a | 5.5a | 0.3a | 57.9a | 0.27a | 1.2a | 1.1a |

Nota: Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

3.5.3 Calidad del Cambisol por tiempo de uso agropecuario

El análisis de los datos del CM con usos del suelo agrupados por año (tiempo de uso), mostró diferencias estadísticamente significativas en MO, P, K y DA (Cuadro 3.3). Los contenidos de MO más altos se registraron en VS en 1984 y 2019, y los más bajos en CT, CA y Pa de 1984. Estos resultados evidencian el efecto del tiempo de uso en el CM, después de 35 años continuos con cultivos y pastizales, el nivel de MO disminuyó 55.8 % en comparación con el CM con vegetación; inversamente, el CM con VS denota el servicio ecosistémico de conservación del suelo por la vegetación natural, en contraste con los sistemas de cultivos (Jin et al., 2021).

Cuadro 3.3 Valores medios de los indicadores de calidad del CM agrupando usos del suelo por año (tiempo de uso) en la RR.

| Año | Uso | PH | CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$) | MO (%) | N (%) | P (mg kg^{-1}) | K ($\text{Cmol}(+) \text{kg}^{-1}$) | DA (g cm^3) | EA (DMP) |
|------|-----|------|------------------------------|--------|-------|---------------------------|---------------------------------------|------------------------|----------|
| 1984 | CT | 6.8a | 85.5a | 2.5b | 0.1a | 40.4b | 0.3a | 1.2ab | 1.4a |
| | CA | 6.4a | 71.0a | 3.2b | 0.2a | 30.4b | 0.3a | 1.1b | 0.8a |
| | Pa | 6.1a | 60.5a | 2.9b | 0.2a | 77.9a | 0.18a | 1.4a | 0.5a |
| | VS | 6.6a | 86.4a | 6.5a | 0.3a | 57.0ab | 0.2a | 1.2ab | 0.9a |
| 2000 | CT | 6.7a | 89.6a | 3.8a | 0.2a | 35.0a | 0.65a | 1.1a | 0.7a |
| | CA | 7.0a | 80.1a | 2.5a | 0.2a | 32.3a | 0.33b | 1.3a | 1.6a |
| | Pa | 7.1a | 76.8a | 3.9a | 0.3a | 26.7a | 0.23b | 1.4a | 0.7a |
| | VS | 6.1a | 60.2a | 4.6a | 0.2a | 60.2a | 0.25b | 1.2a | 1.1a |
| | CT | 6.1a | 48.4a | 1.7b | 0.3a | 37.8a | 0.35a | 1.4a | 0.8a |

| | | | | | | | | | |
|------|----|------|--------|------|------|-------|-------|------|------|
| | CA | 7.4a | 107.1a | 4.1a | 0.3a | 27.3a | 0.43a | 1.1a | 1.4a |
| 2019 | Pa | 7.0a | 122.3a | 5.3a | 0.3a | 46.5a | 0.38a | 1.1a | 0.6a |
| | VS | 6.5a | 96.4a | 5.6a | 0.3a | 56.3a | 0.35a | 1.0a | 1.3a |

Nota: Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Los contenidos más altos de P se observaron en Pa en 1984, y los más bajos en CT y CA del mismo año (Cuadro 3). El valor de P en Pa, concuerda con reportes de Burst *et al.* (2020) en un suelo con pastizal, y puede atribuirse a la aplicación de fertilizantes minerales de P (Alabi *et al.*, 2019) y residuos del pastoreo (estiércol y orina de ganado), que incrementan la disponibilidad de P en el suelo (Ramírez-Iglesias *et al.*, 2017).

El contenido de K fue mayor en CT en 2000, y menor en otros usos del mismo año (Cuadro 3.3). El nivel de K en CT se asocia a la aplicación frecuente de fertilizantes (Pouladi *et al.*, 2020), y cuando cesa la actividad agrícola éstos disminuyen (Xu *et al.*, 2021).

En cuanto a la DA, los mayores valores se registraron en Pa de 1984 (Cuadro 3), lo que confirma la compactación del suelo atribuible al pisoteo del ganado vacuno durante 35 años, similar a reportes de DA de 1.4 a 1.6 g cm³ en pastizales de 24 años por Ajayi *et al.* (2021); este proceso demerita la calidad del suelo, ya que genera resistencia para el crecimiento de las raíces, altera la distribución y conectividad de los poros del suelo (Burst, *et al.*, 2020), modifica la retención, infiltración y disponibilidad de agua, la aireación del suelo, lo que afecta la biota edáfica (Wu *et al.*, 2021); además, la compactación incrementa la erosión hídrica por escorrentía superficial, aumenta la evaporación y temperatura del suelo, y reduce la productividad del mismo (Burst, *et al.*, 2020; Ajayi *et al.*, 2021). La DA baja que mostro diferencia estadística significativa fue en CA de 1984 (Cuadro 3.3), por efecto de la labranza antes de la siembra de la caña de azúcar, ya que dicha actividad disminuye la DA (De Freitas *et al.*, 2018).

3.6 CONCLUSIONES

Los altos contenidos de materia orgánica (MO) de los Cambisoles (CM) con vegetación secundaria (VS) en los tres años de evaluación (1984, 2000 y 2019), evidenciaron mayor calidad de suelo en comparación con CM con cultivos de temporal (CT) y anuales (CA) en la región de Los Ríos (RR), Tabasco.

La alta densidad aparente (DA) registrada en CM con pastizales (Pa) que datan 1984, indican demérito de la calidad del suelo por compactación, a consecuencia del pastoreo de la ganadería extensiva durante 35 años.

Los mayores contenidos de potasio (K) en CT de varios años, y de fósforo (P) en Pa de 1984, se explican por la aplicación de fertilizantes. Los niveles de P en Pa, posiblemente se complementan con residuos, como estiércol y orina aportados por el ganado.

Los contenidos de MO y DA fueron los mejores indicadores de calidad del suelo Cambisol por efecto del uso agropecuario y el tiempo en la RR, Tabasco, toda vez que los mayores y menores valores se obtuvieron en 1984

CAPÍTULO IV. VALORACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE USOS AGROPECUARIOS EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS, TABASCO

4.1 RESUMEN

El incremento de los sistemas agropecuarios en el periodo 1947-2019 en la región de los Ríos (RR), estado de Tabasco, causó la deforestación de extensas superficies de vegetación natural y deterioro de la calidad del suelo. Estos cambios condujeron a la pregunta ¿Cuál es el nivel de sustentabilidad de los usos agropecuarios actuales en la RR? El objetivo de la investigación fue valorar la sustentabilidad de tres usos agropecuarios en la RR, Tabasco, México. Se seleccionaron indicadores de sustentabilidad de los componentes social, económico y ecológico, mediante revisión de literatura. Se aplicó una entrevista semiestructurada a productores de los usos: cultivo temporal, pastizal y vegetación secundaria, sobre suelo Cambisol. Los resultados de las entrevistas se compararon con los indicadores de los componentes para conocer los niveles de sustentabilidad de los usos agropecuarios. Los usos agropecuarios de la RR, en los componentes social, económico y ecológico, presentaron indicadores de sustentabilidad: a) positivos en escolaridad, migración, empleo, superficie de producción, satisfacción de necesidades, productividad, índice de Shannon, índice de equidad de Pielou, nitrógeno y clase de tierra, y b) negativos en acciones para recuperar la producción ante eventos hidrometeorológicos, ingreso por productividad de los usos agropecuarios y acciones para la conservación de tierras. Por uso del suelo, sobresalieron otros indicadores de sustentabilidad negativos: a) riqueza específica, aplicación de plaguicidas, materia orgánica y densidad aparente del suelo, en cultivo de temporal; b) apoyos gubernamentales, escolaridad, empleo y productividad de los usos agropecuarios, en vegetación secundaria; y c) apoyos gubernamentales en pastizal. Para mejorar los niveles de sustentabilidad de los usos agropecuarios de la RR, se recomienda implementar tecnologías agroecológicas amigables con el ambiente, que generen beneficios sociales y mejoren los ingresos por productividad, complementadas con capacitación técnica de los productores.

4.2 ABSTRACT

The increase in agricultural systems in the period 1947-2019 in the Los Ríos region (RR), Tabasco state, caused the deforestation of large areas of natural vegetation and deterioration of soil quality. These changes led to the question: ¿What is the level of sustainability of the current agricultural uses in the RR? The objective of the research was to assess the sustainability of three agricultural uses in the RR, Tabasco, Mexico. Sustainability indicators were selected for the social, economic and ecological components, through a literature review. A semi-structured interview was applied to producers of the uses: temporary cultivation, pasture and secondary vegetation, on Cambisol soil. The results of the interviews were compared with the indicators of the components to know the levels of sustainability of the agricultural uses. The agricultural uses of RR, in the social, economic and ecological components, presented sustainability indicators: a) positive in schooling, migration, employment, production area, satisfaction of needs, productivity, Shannon index, Pielou equity index, nitrogen and type of land, and b) negative in actions to recover production in the face of hydrometeorological events, income from productivity of agricultural uses and actions for land conservation. By land use, other negative sustainability indicators stood out: a) specific richness, pesticide application, organic matter and bulk density of the soil, in rainfed cultivation; b) government support, schooling, employment and productivity of agricultural uses, in secondary vegetation; and c) government support in pasture. To improve the levels of sustainability of agricultural uses of RR, it is recommended to implement environmentally friendly agroecological technologies that generate social benefits and improve productivity income, complemented with technical training for producers.

4.3 INTRODUCCIÓN

El incremento de la población mundial para el año 2050, estimado en dos mil millones de habitantes, aumentará la demanda de alimentos (Kriesemer et al., 2016). Para satisfacer esta demanda, se debe proteger el medio ambiente y lograr un desarrollo agrícola sostenible (Shah et al., 2021), por lo que es fundamental la conservación del suelo y el agua (Pang et al., 2020), tomando en cuenta que los sistemas agrícolas operan en varias

escalas espaciales y temporales, e interactúan con sistemas biofísicos, económicos y sociales (Antle y Ray, 2020).

En las últimas décadas, se han impulsado actividades agropecuarias para contribuir a erradicar la pobreza con impacto mínimo al ambiente (Fonseca-Carreño et al., 2016), incorporando el concepto de “desarrollo sostenible” bajo la premisa de que la agricultura debe satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras, y garantizar la rentabilidad, la salud ambiental, la equidad social y económica (Fonseca-Carreño et al., 2016; Kriesemer et al., 2016). Por consiguiente, se requiere valorar los usos agropecuarios para vigilar su nivel de sustentabilidad e implementar las acciones correctivas necesarias.

En la evaluación de la sustentabilidad se aplican diversas metodologías para caracterizar la situación actual y medir el progreso hasta el alcanzar el objetivo final (Soulé et al., 2021). En el caso de un sistema agrícola, se consideran los elementos que lo integran, y se aplican metodologías multi propósito sustentadas en procesos participativos (Nair y Toth, 2016). La evaluación de la sustentabilidad de los sistemas alimentarios se basa en indicadores de escala local hasta global (Zhang et al., 2021), y se aplican modelos para evaluar el rendimiento y el comportamiento del sistema (Nair y Toth, 2016). Los indicadores no son universales, se deben aplicar según las diferencias en la escala de análisis (parcela, sistema de cultivo, región, etc.), tipo de establecimiento, objetivos deseados, actividad productiva y características de los agricultores (Sarandón y Flores, 2009).

En esta investigación se adoptó la región de Los Ríos (RR), estado de Tabasco, como área representativa del sureste de México, donde el incremento de los sistemas agropecuarios entre 1947 y 2019 deforestaron extensas superficies de vegetación, mayormente selvas altas y medianas (Ramírez-García et al., 2022a), lo que provocó disminución de la calidad del suelo por degradación de la materia orgánica en zonas de cultivo temporal y pastizal, e incrementó la densidad aparente en pastizales mayores a 35 años (Ramírez-García et al., 2022b). Estos antecedentes condujeron a la pregunta ¿Cuál es el nivel de sustentabilidad de los usos agropecuarios actuales en la RR? Con base en los resultados de la investigación, se espera contribuir con información que

ayude a proponer acciones que favorezcan el desarrollo de las actividades agropecuarias en el contexto de la sustentabilidad (Franco et al., 2016), para garantizar la conservación y recuperación del recurso suelo para las generaciones actuales y futuras de la región. El objetivo de este trabajo fue valorar la sustentabilidad de tres usos agropecuarios utilizando indicadores sociales, económicos y ecológicos en la Región de Los Ríos, Tabasco, México.

4.4 MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la Región de Los Ríos (RR), en los municipios de Balancán, Emiliano Zapata y Tenosique, ubicada al este del estado de Tabasco, en una superficie de 6 234.2 km², entre las coordenadas UTM: 1907911.5 y 1988414.0 N, y 713308.9 y 624082.4 E. Colinda al norte y oeste con los estados de Campeche y Chiapas, y al este y sur con la República de Guatemala. De norte a sur, prevalecen los climas cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw2), cálido húmedo con lluvias abundantes en verano (Am(f)), y cálido húmedo con lluvias abundantes todo el año (Af(m)); la precipitación media anual varía de 1 600 a 2 000 mm, y la temperatura media anual oscila de 26 a 28°C (Aceves-Navarro y Rivera-Hernández, 2019). Sobresalen paisajes geomorfológicos de planicie, lomerío y montaña, drenados por los ríos Usumacinta y San Pedro (Ramírez-García et al., 2022a).

4.4.1 Selección de indicadores de sustentabilidad

Mediante revisión de literatura, se seleccionaron indicadores que cubrieran las dimensiones de sustentabilidad social, económica y ecológica, que fueran fáciles de obtener e interpretar, y que brindaran la información necesaria para estudiar los sistemas agropecuarios (Jumbo-Benítez et al., 2020).

4.4.2 Diseño de la entrevista a productores

Se elaboró una entrevista semiestructurada (Anexo I) considerando los indicadores de los componentes social, económico y ecológico (Singh et al., 2012). Se hizo énfasis en preguntas relacionadas con programas sociales aplicados por el gobierno, aplicación de agroquímicos, ingreso por producción y acciones de conservación de suelos.

4.4.3 Selección de usos agropecuarios y aplicación de la entrevista

Se seleccionaron tres usos agropecuarios sobre un suelo Cambisol (CM), con base en un mapa de uso del suelo de 2019 (Ramírez-García et al., 2022a):

- a) Cultivo temporal (CT): con ciclo vegetativo de un año, puede ser monocultivo o policultivo de maíz y frijol.
- b) Pastizal (P): comunidad de plantas herbáceas con especies dominantes de gramíneas utilizadas para la ganadería extensiva.
- c) Vegetación secundaria (VS): plantas que derivan de vegetación original afectada por actividades humanas (INEGI, 2017; Zamora-Crescencio et al., 2018).

Para cada uso se eligieron parcelas de muestreo con cuatro repeticiones, obteniéndose 12 parcelas en total. La edad de cada uso fue igual o menor a cinco años. La entrevista se aplicó a los productores propietarios de las superficies con los usos descritos.

4.4.4 Muestreo de diversidad de plantas en los sistemas agropecuarios

En cada uso de suelo y sus repeticiones, se tomaron ocho muestras de forma aleatoria con la ayuda de cuadros de metal de 50 x 50 cm, en los cuales se registraron las especies de arvenses y árboles, para cada especie se obtuvieron los siguientes datos: nombre común, número de individuo y porcentaje de cobertura (Obrador-Olán et al., 2019). Las plantas que no fueron identificadas en el campo se colectaron y llevaron al herbario CSAT del Campus Tabasco, donde se verificó su identidad taxonómica mediante el uso de un microscopio estereoscopio y el apoyo de bibliografía especializada.

4.4.5 Índices de diversidad de plantas

Con los datos de las plantas colectadas, se obtuvieron índices de diversidad (indican la riqueza de elementos que tiene un agroecosistema en un momento determinado), integrados por tres indicadores de biodiversidad agropecuaria:

- a) riqueza específica (S), número de especies del agroecosistema,

- b) índice de Shannon (H'), asume que los individuos son seleccionados al azar y que todas las especies están representadas en la muestra, y
- c) equidad (E), su valor varía de 0 a 1, 1 corresponde a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes y 0 señala la ausencia de uniformidad (Valdez et al., 2018; Obrador-Olán et al., 2019).

4.4.6 Datos de calidad del suelo

Los datos de calidad del suelo CM, de la capa de 0 a 30 cm de profundidad, se adoptaron de Ramírez-García et al. (2022b), y se interpretaron con base en criterios reportados en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) y Salgado-García et al. (2006).

4.4.7 Organización de la información de las entrevistas

La información obtenida en las entrevistas y en el muestreo de vegetación, se organizó por indicador de sustentabilidad y uso del suelo (Anexo II). Posteriormente, la información se estandarizó asignando un valor a la respuesta de cada variable, para que fueran comparables entre sí.

4.4.8 Indicadores y niveles de valoración de la sustentabilidad

Para cada indicador de sustentabilidad, los niveles de valoración variaron de 0 a 4, donde 4 significa el valor mayor del indicador y 0 el valor más bajo del indicador (Cuadros 4.1, 4.2 y 4.3) (Sarandón et al., 2006; Merma y Julca, 2012; Jumbo-Benítez et al., 2020).

Cuadro 4.1 Indicadores y niveles de valoración de la sustentabilidad del componente social en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco.

| Clave | Indicador social | Niveles de sustentabilidad | | | | |
|-------|---|----------------------------|----------|------------|----------------|----------------|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| A1 | Escolaridad (grado) ¹ | Sin acceso | Primaria | Secundaria | Media superior | Univer-sitario |
| A2 | Migración (No. de migrantes) ² | Muy alta | Alta | Media | Muy baja | Nula |

| | | | | | | |
|----|---|----|------------|----|----|----|
| | | >3 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| A3 | Apoyo gubernamental (No. de programas) ¹ | 0 | Otro apoyo | 1 | 2 | ≥3 |
| B | Empleo (No. de empleos generados) ² | 0 | <1 | <2 | >3 | ≥5 |
| C | Recuperación de los productores ante eventos hidrometeorológicos (No. de acciones) ³ | 0 | 1 | 2 | 3 | ≥4 |

¹ Peña et al., 2018; ² Castelán-Vega et al., 2014; ³ Elaboración propia.

Cuadro 4.2 Indicadores y niveles de valoración de la sustentabilidad del componente económico en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco.

| Clave | Indicador económico | Niveles de sustentabilidad | | | | | |
|-------|---|----------------------------|---------------------|-------------|------------|-------------------|-----|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| A1 | Superficie de producción (ha) ¹ | <0.5 | 0.5 a 1 | 1.1 a 1.5 | 1.6 a 2 | > 2 | |
| A2 | Satisfacción de necesidades (grado de satisfacción con su producción) ¹ | No satisfecho | Poco | No del todo | Conten-to | Muy contento | |
| B | Producti- vidad de los usos agrope- cuarios (produc- tos) | Maíz (t ha ⁻¹) | Sin produc- ción | < 2 | ≥ 2 | < 4 | ≥ 4 |
| | Unidad animal/ha/año ^{2,3,4} | >1.9 | >1.7 ³ | >1.4 a 1.7 | ≥0.7 a 1.4 | <0.7 ² | |
| | No. de productos vegetales (madera, leña, estacas, muebles, medicinal, comestible ⁵ , ramonéo) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | |

| | | | | | | |
|---|---|----|-----------------|----|----|-----------------|
| C | Ingreso por productividad de los usos agropecuarios (No. Salarios mínimos mensuales) ^{5,6,7} | <1 | ≥1 ⁶ | ≥2 | <3 | ≥3 ⁵ |
|---|---|----|-----------------|----|----|-----------------|

¹Guevara y Vásquez (2019); 0.7 UA/ha/año; ²Manjarrez-Muñoz et al. (2007); ³1.7 UA/ha/año (Zavala-Cruz y Castillo-Acosta, 2007); ⁴Granados-Rivera et al. (2018); ⁵elaboración propia con base en el intervalo de la línea de pobreza por ingresos <14239.52 mensuales, en un hogar integrado por cuatro personas (CONEVAL, 2021); ⁶salario mínimo = \$195.43/día (CONASAMI, 2022), de donde 1 salario mínimo mensual= \$4690.00.

Cuadro 4.3 Indicadores y niveles de valoración de la sustentabilidad del componente ecológico en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco.

| Clave Indicador ecológico | | Niveles de sustentabilidad | | | | |
|---------------------------|---|----------------------------|------------|-------------|-------------|-------|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| A1 | Riqueza específica (S) (No. de especies en 50 x 50 cm) ¹ | 0 | ≤3 | <9 | ≥9 | ≥12 |
| A2 | Índice de Shannon (H') ¹ | 0 | ≤0.3 | ≤0.6 | <1 | ≥1 |
| A3 | Índice de equidad de Pielou (E) ¹ | 0 | ≤0.25 | ≤0.50 | ≤0.75 | ≤1 |
| B1 | Aplicación de plaguicidas tóxicos ² (No. de veces por ciclo) | >4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| B2 | Aplicación de fertilizantes ² (No. de veces por ciclo) | >4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| C2 | Materia orgánica (%) ³ | <0.5 | 0.6 a 1.5 | 1.6 a 3.5 | 3.6 a 6 | >6 |
| C3 | Nitrógeno (%) ⁴ | <0.05 | 0.05 a 0.1 | 0.1 a 0.15 | 0.15 a 0.25 | >0.25 |
| C6 | Densidad aparente (g cm ³) ³ | >1.33 | 1.32 | 1.21 a 1.31 | 1 a 1.2 | <1 |

| | | | | | | |
|----|---|-----------------------------------|-----------------------|---|-------------------------|---|
| D1 | Conservación de tierras (acciones de conservación) ^{5,6} | Arado de subsuelo y uso de rastra | Preparación del suelo | Aplicación de fertilizantes sin apoyo técnico | Uso de abonos orgánicos | Uso de abonos verdes, compostas, biofertilizantes |
| D2 | Clase de tierra para la producción (según los productores) ² | Muy mala | Mala | Regular | Buena | Muy Buena |

Fonseca-Carreño et al., 2015¹; Elaboración propia²; SEMARNAT, 2002³; Salgado-García et al., 2006⁴; Jácome et al., 2020⁵; COLPOS (Colegio de Postgraduados), 1991⁶

4.4.9 Evaluación de la sustentabilidad por indicador

Se cotejaron los resultados obtenidos en las entrevistas (Anexo II) contra los niveles de valoración de la sustentabilidad de indicadores de los componentes social, económico y ecológico (Cuadro 4.1, 4.2, 4.3), para conocer los niveles de sustentabilidad de los usos agropecuarios de la RR (Sarandón et al., 2006; Guevara y Vásquez, 2019).

4.4.10 Evaluación de la sustentabilidad por componente

Los indicadores de cada componente fueron multiplicados según el valor de cada escala con respecto al nivel de sustentabilidad, y el resultado se dividió entre el número de indicadores utilizados. Los indicadores fueron agrupados por componente (Cuadro 4) (Sarandón et al., 2006; Guevara y Vásquez 2019).

4.4.11 Índices de sustentabilidad general de los usos agropecuarios

El índice de sustentabilidad general (ISG) se obtuvo sumando los índices de cada componente y dividiendo este resultado entre el número de componentes (Sarandón et al., 2006). Un sistema será sustentable si el valor del ISG es mayor a 2 y ninguna de las tres dimensiones tiene un valor menor a 2 (Sarandón et al., 2009; Peña et al., 2018). El cálculo de los ISG de los indicadores se basó en fórmulas propuestas por Sarandón et al. (2006), Jácome et al. (2020) y Jumbo-Benítez et al. (2020) (Cuadro 4.4), considerando

los datos de niveles de los indicadores de sustentabilidad de los componentes social, económico y ecológico (Cuadros 4.1, 4.2 y 4.3).

Cuadro 4.4 Fórmulas empleadas para calcular el Índice General de Sustentabilidad.

| Componente | Fórmulas |
|-------------------------------------|--|
| Indicador social = | $\frac{((A1+A2+A)/3)+B+C}{3}$ |
| Indicador económico = | $\frac{((A1+A2)/2)+A3+(2*B)}{4}$ |
| Indicador ecológico = | $\frac{((A1+A2+A3)/3)+((B1+2)/2)+(C1+C2+C3)/3+D1+E2}{5}$ |
| Índice de sustentabilidad general = | $\frac{\text{Índice social} + \text{Índice económico} + \text{Índice ecológico}}{3}$ |

Nota: el significado de A, A1, A2, A3, B, B1, C1, C2, C3, D1 y E2 se presenta en los cuadros 4.1, 4.2 y 4.3.

4.5 RESULTADOS

4.5.1 Componente social de los usos agropecuarios

Los productores agropecuarios entrevistados son de sexo masculino (100%), su edad varió entre 40 y 70 años. La escolaridad correspondió a los siguientes niveles: secundaria 50%, primaria 33%, y nivel medio superior 17% (Anexo II, Cuadro 2.1). La emigración se presenta en todos los usos, los CT y P presentaron el mayor porcentaje (43%) y la VS el más bajo (14%) (Anexo II, Cuadro 2.2). Los programas gubernamentales apoyan al 50% de los entrevistados, siendo los de CT los más beneficiados por el programa nacional sembrando vida; el otro 50% no recibe apoyos (Anexo II, Cuadro 2.3). La generación de empleos es mayor en el CT (48%), seguido del P (38%) y la VS (15%) (Anexo II, Cuadro

2.4). Los productores de CT siembran maíz o frijol en el tiempo adecuado para lograr mejores cosechas, cuando el maíz no alcanza un desarrollo adecuado lo utilizan para alimentar el ganado. En los P, en la época de estiaje escasea el agua y los forrajes, para mitigar el problema tienen pozos y a veces el municipio apoya con pipas de agua y alimento para el ganado. La VS se regenera de manera natural, su uso es escaso (Anexo II, Cuadro 2.5).

4.5.2 Componente económico de los usos agropecuarios

Los productores de CT poseen extensiones de 7 a 26 ha, y utilizan 2 a 7.5 ha para la producción. Los de P tienen superficies de 14 a 40 ha. En la VS las superficies tienen 6 a 16 ha, suficiente para su producción (Anexo II, Cuadro 2.6). El 92% de los productores están satisfechos con su producción (Anexo II, Cuadro 2.7).

Respecto a la producción, en los CT el rendimiento de maíz varía de 1 a 4 t/ha; solo un entrevistado cosecha frijol (Anexo II, cuadro 2.8.1). En el P los productores reportaron cuatro cabezas de ganado/ha (Anexo II, Cuadro 2.8.2). En la VS la producción consiste en postes para cercas y leña; otro beneficio consiste en el ramoneo del ganado que consume varias especies de plantas. Los ingresos por producción son variables, los mayores se obtienen en el P por venta de becerros, y los menores en la VS; los CT registran ingresos intermedios (Anexo II, Cuadros 2.9.1, 2.9.2.3 y 2.9.3).

4.5.3 Componente ecológico de los usos agropecuarios

En el componente ecológico, la VS reportó mayor número de especies, seguida de CT y P. Los índices de Shannon evidencian que la VS presentó un valor superior a uno, la mayoría (75%) de los sitios de CT y P registraron valores inferiores a uno; el P está compuesto por gramíneas nativas, introducidas o mejoradas. En el índice de equidad, los valores más altos se observaron en la VS, y los más bajos en CT y P, lo que indica ausencia de uniformidad (Cuadro 4.5).

El uso de plaguicidas fue mayor en CT, los usos P y VS no reportaron uso de agrotóxicos (Anexo II, Cuadro 2.12). Los productores aplican fertilizantes sintéticos, mayormente triple 17 y urea en los CT (Anexo II, Cuadro 2.13). El 75% de los entrevistados calificó a su tierra como buena a muy buena para producir, solo tres la calificaron como regular

(Anexo II, Cuadro 2.14). Los productores realizan prácticas de manejo del suelo, en los CT sobresale el arado y descanso del suelo, solo un entrevistado usa abono orgánico; en el P hacen rotación de terrenos para el pastoreo del ganado y resiembra del forraje; y en la VS las plantas se regeneran naturalmente (Anexo II, Cuadro 2.15).

Respecto a la calidad del suelo, los mayores porcentajes de materia orgánica (MO) y nitrógeno (N) se registraron en VS, y los más bajos en CT (Anexo II, Cuadro 2.16). La densidad aparente (DA g cm³) mostró valores mayores en CT y P (1.2 a 1.6), y menores en VS (0.9) (Anexo II, Cuadro 2.16).

Cuadro 4.5. Indicadores de diversidad de vegetación en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco.

| Uso del suelo | Riqueza específica (S) | Índice de Shannon (H) | Índice de equidad de Pielou (E) |
|---------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| CT1 | 3 | 0.4 | 0.35 |
| CT2 | 10 | 2 | 0.49 |
| CT3 | 3 | 0.3 | 0.24 |
| CT4 | 3 | 0.6 | 0.58 |
| P1 | 5 | 1.3 | 0.84 |
| P2 | 5 | 0.7 | 0.44 |
| P3 | 8 | 0.6 | 0.28 |
| P4 | 8 | 0.9 | 0.41 |
| VS1 | 15 | 1.7 | 0.64 |
| VS2 | 10 | 1.6 | 0.69 |
| VS3 | 9 | 1.8 | 0.82 |

| | | | |
|-----|----|-----|------|
| VS4 | 10 | 1.1 | 0.49 |
|-----|----|-----|------|

4.5.4 Indicadores de sustentabilidad del componente social

Cuadro 4.6 Valoración de sustentabilidad del componente social en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco.

En el componente social, los indicadores que calificaron como sustentables (niveles > 2), correspondieron a migración en los tres usos agropecuarios, seguido de escolaridad y empleos generados en CT y P. El apoyo gubernamental mediante programas solo es sustentable en CT. Los indicadores no sustentables (niveles < 2) concordaron con acciones para recuperar la producción ante eventos hidrometeorológicos en P y VS, y en el 50% de los sitios de CT; seguido de apoyo gubernamental en el 50% o más sitios de VS y P. La VS registró el mayor número de indicadores no sustentables, excepto migración, en el 50 a 100% de los sitios (Cuadro 4.6).

| Clave | Indicadores sociales Variables | Cultivo temporal | | | | P1 | Pastizal | | | | Vegetación secundaria | | | |
|-------|--|------------------|-----|-----|-----|----|----------|----|----|-----|-----------------------|-----|-----|--|
| | | CT1 | CT2 | CT3 | CT4 | | P2 | P3 | P4 | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 | |
| A1 | Escolaridad (grado) | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | |
| A2 | Migración (No. de migrantes) | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 0 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | |
| A3 | Apoyo gubernamental (No. De programas) | 2 | 2 | 2 | 0 | 4 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | |
| B | Empleo (No. de empleos generados) | 4 | 2 | 3 | 0 | 2 | 3 | 3 | 4 | 0 | 2 | 3 | 1 | |
| C | Recuperación de los productores ante eventos hidrometeorológicos (No. de acciones) | 2 | 3 | 1 | 1 | 0 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | |

4.5.5 Indicadores de sustentabilidad del componente económico

Los Indicadores económicos que mostraron niveles sustentables fueron superficie de producción y satisfacción de las necesidades, en todos los usos; seguido de productividad de los usos agropecuarios en CT y P. Los niveles no sustentables

correspondieron a ingreso por productividad de los usos agropecuarios en VS y el 50% de los sitios de CT y P; la VS también registró la mitad de los sitios no sustentables en productividad de los usos (Cuadro 4.7).

Cuadro 4.7 Valoración de la sustentabilidad del componente económico en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco.

| Clave | Indicadores económicos Variables | Cultivo temporal | | | | Pastizal | | | | Vegetación secundaria | | | |
|-------|--|------------------|-----|-----|-----|----------|----|----|----|-----------------------|-----|-----|-----|
| | | CT1 | CT2 | CT3 | CT4 | P1 | P2 | P3 | P4 | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 |
| A1 | Superficie de producción (ha) | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| A2 | Satisfacción de necesidades (grado de satisfacción con su producción) | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 1 | 3 |
| B | Productividad de los usos agropecuarios (productos) | 2 | 1 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| C | Ingreso por productividad de los usos agropecuarios (No. Salarios mínimos mensuales) | 1 | 1 | 3 | 4 | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |

4.5.6 Indicadores de sustentabilidad del componente ecológico

En el componente ecológico la mayoría de los indicadores calificaron como sustentables, sobresalieron los índices de Shannon y equidad de Pielou, nitrógeno y clase de tierra, en los tres usos agropecuarios; seguido de riqueza específica, aplicación de plaguicidas tóxicos y MO, en los usos P y VS. Todos los indicadores fueron sustentables en la VS. Los indicadores no sustentables coincidieron con riqueza específica, MO, DA y conservación de tierras, en el CT, además de aplicación de plaguicidas tóxicos en el 50% de los sitios del mismo uso. La conservación de tierras fue el único indicador negativo en P (Cuadro 4.8).

Cuadro 4.8 Valoración de la sustentabilidad del componente ecológico en usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco.

| Clave | Indicadores ecológicos Variables | Cultivo temporal | | | | Pastizal | | | | Vegetación secundaria | | | |
|-------|-------------------------------------|------------------|-----|-----|-----|----------|----|----|----|-----------------------|-----|-----|-----|
| | | CT1 | CT2 | CT3 | CT4 | P1 | P2 | P3 | P4 | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | Riqueza específica (S) (No. de especies en 50x 50 cm) | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| A2 | Índice de Shannon (H') | 2 | 4 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| A3 | Índice de Equidad de Pielou (E) | 2 | 2 | 1 | 3 | 4 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| B1 | Aplicación de plaguicidas tóxicos ² (No. de veces por ciclo) | 3 | 1 | 0 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| B2 | Aplicación de fertilizantes ² (No. de veces por ciclo) | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| C2 | Materia orgánica (%) | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 |
| C3 | Nitrógeno (%) | 1 | 4 | 4 | 2 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| C6 | Densidad aparente (g cm ³) | 0 | 4 | 0 | 0 | 2 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 |
| D1 | Conservación de tierras (acciones de conservación) | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| D2 | Clase de tierra para la producción (según los productores) | 3 | 3 | 2 | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 |

4.5.7 Índices de sustentabilidad por componente social, económico y ecológico

El análisis de sustentabilidad por componente, denota que en el social los usos CT y P son sustentables en el 50% de los sitios, y la VS evidenció mayoría de sitios no sustentables. En el componente económico, los sitios sustentables correspondieron a 100% en el P y 50% en el CT; en la VS prevalecieron sitios no sustentables. En el componente ecológico, los sitios sustentables se ubicaron en P y VS en un 100%, y la mitad en el CT (Figura 4.1).

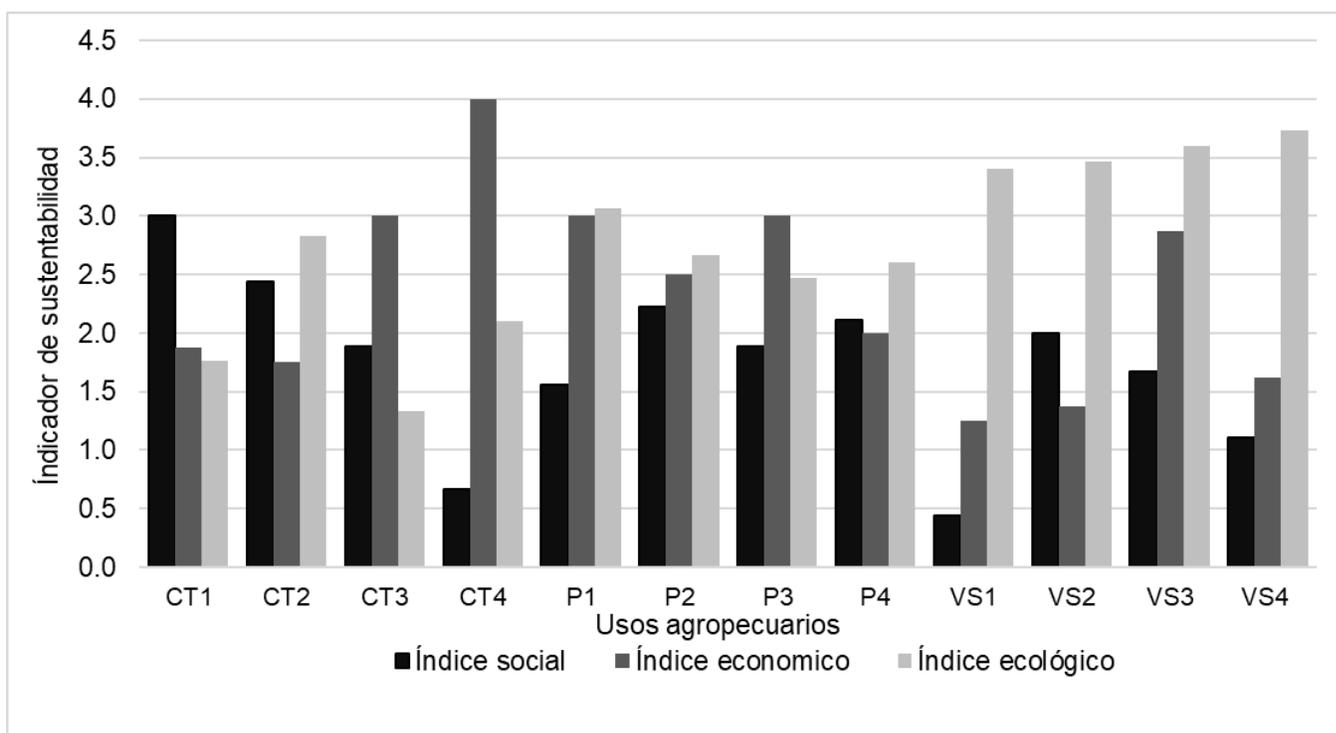


Figura 4.1. Índices de sustentabilidad por componente social, económico y ecológico de los usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco, México.

4.5.8 Índice de sustentabilidad general de los usos agropecuarios

La valoración del ISG evidenció que todos los usos del suelo analizados fueron sustentables, excepto un sitio en VS (Figura 4.2).

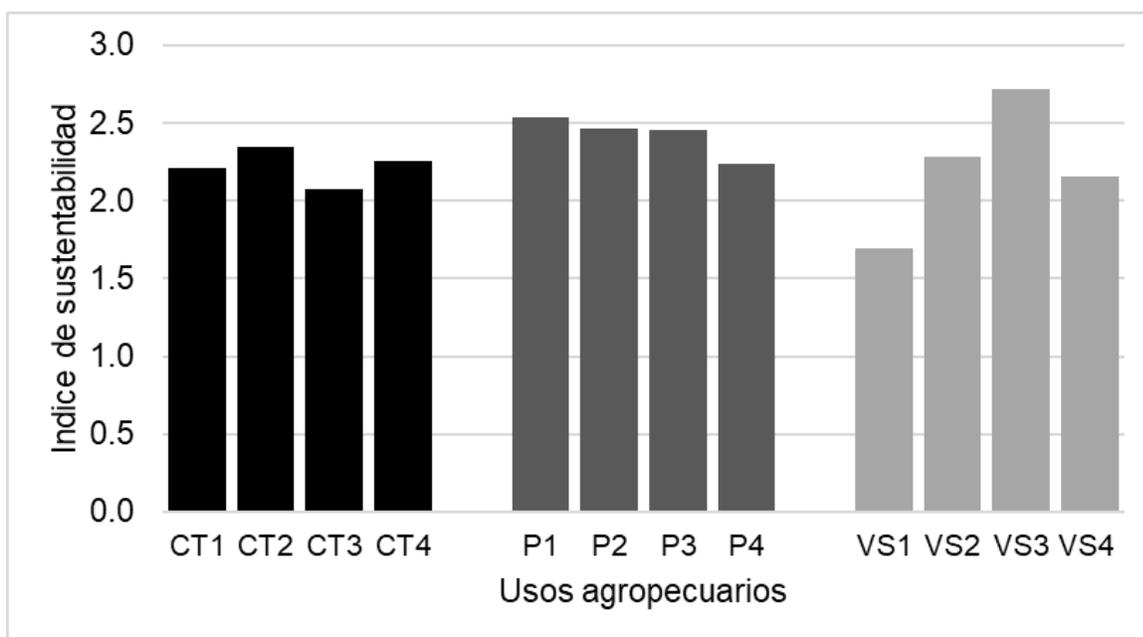


Figura 4.2. Índice de sustentabilidad general de usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco, México.

4.6 DISCUSIÓN

4.6.1 Usos del suelo agropecuarios

Los resultados de las entrevistas denotan que en el componente social el nivel de educación de los productores es bajo, considerando que el 83% cursó primaria y secundaria, similar a lo registrado por Isaac-Márquez et al. (2005), lo cual refleja el nivel educativo al que pueden en escuelas rurales de la región (Jumbo-Benítez et al., 2020). Un mayor nivel de escolaridad podría facilitar la adopción de nuevas tecnologías para el manejo de los sistemas agropecuarios (Guevara y Vásquez, 2019). La migración hacia ciudades de otros estados del sureste de México y a Estados Unidos, converge con la movilidad de los hijos de ejidatarios para emplearse en actividades mejor remuneradas (Reyes-Grande, 2015), debido a la insuficiencia de empleos y oportunidades en la RR (Isaac-Márquez et al., 2005; Castelán-Vega et al., 2014). El problema pudiera ser atenuado mediante la aplicación más amplia de programas gubernamentales como sembrando vida, programa de fomento ganadero (PROGRAN) y programa crédito ganadero a la palabra (Gutiérrez-San Pallo et al., 2019; CONEVAL, 2020). Respecto a

la producción agropecuaria, depende de la disponibilidad de agua, en respuesta los productores ganaderos aplican estrategias adaptativas como el pastoreo en zonas altas durante las inundaciones y el traslado del ganado a zonas bajas en la época de estiaje, para satisfacer la demanda del forraje (Manjarrez-Muñoz et al., 2007).

Respecto al componente económico, la posesión de superficies amplias y el uso de 2 a 15 ha para el cultivo de maíz, es similar a otras áreas agrícolas de Tabasco (Isaac-Márquez et al., 2005). El bajo rendimiento del cultivo de maíz concuerda con valores promedio de 1.5 t/ha para el estado de Tabasco, y 2 t/ha para la RR (Aceves-Navarro et al., 2008). No obstante, los ingresos económicos bajos, la producción en dos periodos de siembra y cosecha al año (Reyes-Grade, 2015), contribuyen a la alimentación de la familia de los productores y a su seguridad alimentaria (Damián-Huato et al., 2016). La baja producción se atribuye al manejo poco tecnificado, escasa inversión en el sistema (Merma y Julca, 2012), e incidencia de plagas y enfermedades que merman la producción (Jácome et al., 2020).

En el P, se registraron mejores ingresos en superficies menores a 40 ha, similar a lo referido por Celorio-Cacep et al. (2021). Los productores ganaderos revelaron un promedio de 4 UA/ha, este dato sobreestima la capacidad de carga de los pastizales de la región, la cual varía de 0.7 UA/ha (Manjarrez-Muñoz et al., 2008) a 1.7 UA/ha (Zavala-Cruz y Castillo-Acosta, 2007) en el estado de Tabasco. El principal ingreso del sistema de producción vaca-becerro es por venta becerros de 180 kg de peso, a \$8000 cada uno, los cuales se distribuyen por intermediarios a estados del centro y norte del país (Manjarrez-Muñoz et al., 2007; Granados-Rivera et al., 2018; Celorio-Cacep et al., 2021). En la VS hay pocos datos sobre ingresos económicos derivados de los productos de la vegetación. Los productores utilizan especies de plantas de la VS, sobresale la venta de estacas, similar a lo encontrado por Cabrera et al. (2013); el aprovechamiento de la leña es para autoconsumo en los hogares, a diferencia de lo reportado por Mozo-Ocegueda y Silva-Aparicio (2022) quienes mencionan que obtienen ingresos económicos por venta de leña. La utilidad del ramoneo de plantas por el ganado en la VS, se deduce por el número de UA/ha y la venta de becerros como producto principal. Este uso suele ser utilizado como sistema silvopastoril natural (Alayon-Gamboa y Álvarez Flores, 2017).

En el componente ecológico, los CT presentaron los datos más bajos de diversidad de vegetación (riqueza específica, Shannon, Pielou), en convergencia con lo reportado por Young-Mathews et al. (2010). Además, el uso de agroquímicos, especialmente fertilizantes sintéticos, es promovido por los ayuntamientos de Balancán y Tenosique provocando dependencia de los productores a estos insumos (Isaac-Márquez et al., 2005).

En el P, los indicadores de vegetación intermedios se asocian al predominio de gramíneas introducidas para la producción de forraje, lo que repercute en buenos contenidos de MO y N (Ramírez-García et al., 2022b), pero el pastoreo del ganado vacuno por más de tres décadas incrementa la DA en demérito de la calidad del suelo por compactación (Geissen et al., 2009; Ramírez-García et al., 2022b).

Los índices de diversidad de vegetación más altos en la VS, fueron iguales o menores a los encontrados por Cipriano-Anastasio et al. (2017) y Moreno-Jiménez et al. (2017), principalmente en el índice de Shannon, en contraste con la alta diversidad en VS en valles y lomeríos del norte de Chiapas (López-Pérez et al., 2014). La VS, desarrollada a partir de la alteración de la vegetación primaria (Zamora-Crescencio et al., 2018), es importante por la provisión de servicios ecosistémicos como regulación de los usos agropecuarios, hábitat de flora y fauna, fuente de productos alimentarios, medicinales y forestales, protección del suelo, incremento de la fertilidad y almacenamiento de carbono (Soto-Pinto et al., 2015; Alayon-Gamboa y Álvarez-Flores, 2018). El nulo uso de agroquímicos en la VS favorece la salud de suelo y ayuda a recuperar las condiciones del sitio y a mantener la capacidad de regeneración de la vegetación natural (Soto-Pinto et al., 2015).

4.6.2 Indicadores de sustentabilidad

En el componente social, los indicadores sustentables por migración, escolaridad y empleos generados, permiten inferir algunas condiciones favorables para los productores agropecuarios de la RR, lo que posiblemente se asocia a la satisfacción de necesidades básicas (Guevara y Vásquez, 2019), y al arraigo de la población en la región (Ortiz-Palomeque y Galmiche-Tejeda, 2021). Sin embargo, la existencia de 50% o más

sitios con niveles no sustentables, asociados a indicadores como acciones para recuperar la producción ante eventos hidrometeorológicos y apoyo gubernamental a través de programas, denota insuficiencia de acciones oficiales enfocadas a aumentar la sustentabilidad de los usos agrícola y pecuario, similar a lo señalado por Jacome et al. (2020); lo anterior expone a los productores a pérdidas de la producción y mayor dificultad para la recuperación en caso de impactos severos por sequías, inundaciones o ciclones (Silva-Santamaría y Ramírez-Hernández, 2017).

En el componente económico, los indicadores sustentables por superficie de producción, satisfacción de las necesidades y productividad de los usos agropecuarios, en la mayoría de los sitios de los tres usos agropecuarios, ayudan a explicar los indicadores sociales positivos por generación de empleos y baja migración. Estos resultados concuerdan con los aportados por Ortiz-Palomeque y Galmiche-Tejeda, (2021). Los niveles no sustentables por ingreso por productividad de los usos agropecuarios en el 50% o más sitios en CT, P y VS, exhiben los bajos ingresos que reciben los productores por la venta de sus productos, similar a lo descrito por Celorio-Cacep et al. (2021) y Purroy-Vásquez et al., (2016). En los P, el índice de sustentabilidad económico se podría incrementar mejorando las prácticas de manejo (Granados-Rivera et al., 2018) e impulsando los sistemas silvopastoriles (Maldonado-García, 2018). En los CT, es prioritario implementar estrategias sustentables acompañadas de capacitación permanente e innovación de tecnologías que mejoren los rendimientos de los cultivos, en armonía con el medio ambiente (Jacome et al., 2020; Ortiz-Palomeque y Galmiche-Tejeda, 2021). En la VS, la baja sustentabilidad por productividad es consistente con los bajos ingresos mensuales obtenidos por la venta de productos extraídos de esta vegetación (Palacios-Sánchez et al., 2009), no obstante que es fuente de materias primas (estacas, leña, postes) y biomasa de varias plantas que se utilizan como forraje a través de ramoneo del ganado (Cabrera-Pérez et al., 2013; Mozo-Ocegueda y Silva-Aparicio, 2022). Otras opciones de aprovechamiento de los recursos de la VS, consideran el pago por servicios ambientales, y la conservación y uso sustentable mediante programas de desarrollo forestal como el enriquecimiento de acahuals y sistemas agroforestales con plantas útiles, nativas o introducidas (Cortés-Calderón et al., 2021).

En el componente ecológico, la mayoría de los indicadores sustentables asociados a los índices de vegetación de Shannon, equidad de Pielou y riqueza específica, coinciden con los resultados aportados por Iglesias-Gómez et al. (2022). Los indicadores sustentables sobre calidad del suelo como nitrógeno, clase de tierra y MO, mayormente en VS y P, convergen con los de Merma y Julca (2012), confirmando la importancia de la MO en el reciclaje de nutrientes en los ecosistemas y usos de suelo (Bravo-Medina et al., 2017). El registro positivo de todos los indicadores sustentables en la VS, denota su importancia en la generación de servicios ambientales (Cortés-Calderón, 2021; Pain et al., 2021), y la mejora de la fertilidad natural del suelo (Teixeira et al., 2020), para su aprovechamiento posterior en sistemas de cultivo, lo que atenúa el uso de fertilizantes y plaguicidas (Muñoz-Espinoza et al., 2016).

Los indicadores no sustentables en los CT, sobre riqueza específica, MO, DA, conservación de tierras y aplicación de plaguicidas tóxicos, refuerzan la necesidad de desarrollar y aplicar tecnologías agrícolas sustentables para mejorar el suelo, la cobertura vegetal y la provisión de servicios ecosistémicos (Palma-López et al., 2007; Drobnik et al., 2018), evitando el uso de plaguicidas, fertilizantes sintéticos y el paso de maquinaria agrícola, que en conjunto degradan la calidad del suelo (Tian y Niu, 2015; Muñoz-Espinoza et al., 2016; Bisht y Singh-Chauhan, 2020).

En el P, el registro de indicadores sustentables sobre vegetación y suelo, denotan usos compatibles con la capacidad de uso del Cambisol (Palma-López et al., 2007); pero la baja sustentabilidad por conservación de tierras refleja que las acciones de manejo para la conservación del suelo son insuficientes (Bravo-Medina et al. 2017; Enríquez-Quiroz et al., 2021). Por consiguiente, se requiere impulsar estrategias sustentables que contribuyan a la conservación de los recursos naturales y generen beneficios a los productores (Muñoz-Espinoza et al., 2016).

El uso de indicadores permitió identificar una alta variabilidad en los índices de sustentabilidad entre los componentes social, económico y ecológico de los usos del suelo estudiados, similar a lo descrito por Sarandón et al. (2006), Merma y Julca (2012), Guevara y Vásquez (2019) y Jacome et al. (2020). Finalmente, la obtención de un índice general de sustentabilidad del 92% en los usos evaluados, demuestra que los usos

agropecuarios de la RR en general tienen un nivel de sustentabilidad aceptable, en sincronía con lo reportado por Jacome et al. (2022) y Peña et al. (2018).

4.7 CONCLUSIONES

El índice de sustentabilidad general de los usos agropecuarios de la región de Los Ríos (RR), al agrupar los componentes social, económico y ecológico, evidenció niveles aceptables.

Los usos agropecuarios de la región de la RR, por componentes social, económico y ecológico, presentaron indicadores de sustentabilidad: a) positivos en escolaridad, migración, empleo, superficie de producción, satisfacción de necesidades, productividad, índice de Shannon, índice de equidad de Pielou, nitrógeno y clase de tierra, y b) negativos en número de acciones para recuperar la producción ante eventos hidrometeorológicos, ingreso por productividad de los usos agropecuarios y acciones para la conservación de tierras.

Por uso del suelo, sobresalieron otros indicadores de sustentabilidad negativos: a) riqueza específica, aplicación de plaguicidas, materia orgánica y densidad aparente del suelo, en cultivo de temporal; b) apoyos gubernamentales, escolaridad, empleo y productividad de los usos agropecuarios, en vegetación secundaria, y apoyos gubernamentales en pastizal.

CONCLUSIONES GENERALES

El análisis de cambio de uso del suelo en la Región de Los Ríos (RR), Tabasco, México, en el periodo 1947-2019, evidenció crecimiento de las superficies de cultivos, pastizales, plantaciones forestales y zonas urbanas, en un 429% en 72 años.

El incremento de los usos agropecuarios contribuyó a la pérdida del 63.9 % de la vegetación, y la deforestación del 83.7% de las selvas.

Los usos agropecuarios en la RR fueron impulsados mayormente por programas gubernamentales federales como el Plan Balancán-Tenosique, sin consideración de los factores ambientales.

La evaluación de la calidad del suelo con diferentes usos agropecuarios, utilizando métodos convencionales, espectroscopía de infrarrojo cercano y quimiometría, evidencian que con la relación $MO/(arcilla+limo)$, es posible establecer un índice de calidad de suelo (ICS) para evaluar el Cambisol (CM) de la RR.

Con base en el índice de calidad de suelo (ICS) y la tecnología NIRS, se logró predecir que el 58 % de los suelos presentan degradación en la calidad, principalmente por efecto de los usos de CT y CA, ya que el modelo utilizado cumple con los estadísticos y predice correctamente el ICS en el 100 % de los casos.

Los análisis estadísticos de la capa superficial (0-30 cn) de un CM con uso agropecuario, en tres fechas de evaluación (1984, 2000 y 2019), evidencian que la calidad de suelo fue mejor en vegetación secundaria (VS) por efecto de altos contenidos de materia orgánica (MO); inversamente, los CM con cultivos de temporal (CT) y anuales (CA), presentaron menores contenidos de MO, indicando disminución de la calidad del suelo.

La densidad aparente (DA) alta, registrada en pastizales (Pa) establecidos desde 1984, indican demérito de la calidad del suelo por compactación, a consecuencia del pastoreo de la ganadería extensiva.

Los contenidos de MO y DA fueron los mejores indicadores de calidad del CM, asociados al efecto por cambio de uso agropecuario y tiempo de manejo.

Los usos agropecuarios de la región de la RR, por componentes social, económico y ecológico, presentaron indicadores de sustentabilidad: a) positivos en escolaridad,

migración, empleo, superficie de producción, satisfacción de necesidades, productividad, índice de Shannon, índice de equidad de Pielou, nitrógeno y clase de tierra, y b) negativos en número de acciones para recuperar la producción ante eventos hidrometeorológicos, ingreso por productividad de los usos agropecuarios y acciones para la conservación de tierras.

LITERATURA CITADA

- Aceves-Navarro, L. A., y Rivera-Hernández, B. (2019). *La biodiversidad en Tabasco. Estudio de estado (vol. I)*. México: CONABIO. Recuperado de <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/14868.pdf>
- Aceves-Navarro, L. A., Juárez-López, J. F., Palma-López, D. J., López-López, R., Rivera-Hernández, B., Rincón-Ramírez, J. A., Morales-Colorado, R., Hernández-Alvarado, R., y Hernández-Soriano, J. L. (2008). Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del cultivo del maíz (*Zea mays* L.) en el estado de Tabasco, p. 45.
- Ajayi, E., Faloye, T. O., Thorsten, Reinsch, T., y Horn, R. (2021). Changes in soil structure and pore functions under long term/continuous grassland management. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 314, 107407. Doi: 10.1016/j.agee.2021.107407
- Alabi, A. A., Adewale, A. O., Ogungbe, C., Coker, J. O., Akinboro, F. G., y Bolaji G. (2019). Effects of different land uses on soil physical and chemical properties in Odeda LGA, Ogun State, Nigeria. *Environ. Earth. Sci.* 78, 207. Doi: 10.1007/s12665-019-8205-4
- Alayon-Gamboa, J., y Álvarez-Flores, F. (2018). Diversidad e importancia de la vegetación secundaria en un sistema silvopastoril en Yucatán, México. *Agroproductividad*, 10,2. Recuperado de <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/954>
- Amundson, R., Asefaw, B. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., y Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, v 348. <http://doi:10.1126/science.1261071>.
- Antle, J. M., y Ray, S. (2020). *Sustainability of Agricultural Systems. In: Sustainable Agricultural Development*. In Palgrave Studies in Agricultural Economics and Food Policy. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34599-0_3
- Bai, Y., Zha, X., y Chen, S. (2020). Effects of the vegetation restoration years on soil microbial community composition and biomass in degraded lands in Changting

- County, China. *J. For. Res.* 31:1295-1308. <http://doi.org/10.1007/s11676-019-00879-z>.
- Bisht, N., y Singh-Chauhan, P (2020). *Excessive and disproportionate use of chemicals cause soil contamination and nutritional stress*. In Larramendy M. L., y Soloneski, S. *Soil contamination, Threats and sustainable solutions*. Engineering, 3rd ed. 7-8. <https://doi.org/10.3390/mol2net-03-04859>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, Ch., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V. Bagarello, V., Van, O. K, Montanarella, L., y Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat. Commun.* 8:2013. <http://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>.
- Boyle, J. R., Tappeiner, J. C., Waring, R. H., y Smith, C. T. (2016). *Sustainable Forestry: Ecology and Silviculture for Resilient Forests*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09761-X>
- Bravo-Medina, C., Marín H., Marrero-Labrador, P., Ruiz M. E., Torres-Navarrete, B., Navarrete-Alvarado, H., Durazno-Alvarado, G., y Changoluisa-Vargas, D. (2017). Evaluación de la sustentabilidad mediante indicadores en unidades de producción de la provincia de Napo, Amazonia Ecuatoriana. *Bioagro* 29(1), 23-36. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85750098003>
- Brereton, R. G., y Lloyd, G. R. (2014). Partial least squares discriminant analysis: taking the magic away. *Journal Chemometrics*, 28: 213–225. <https://doi.org/10.1002/cem.2609>.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Baic, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., De Goede, R., de Goede, R., Fleskens, L., Geissend, V., Kuiper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Suckel, W., Willem, J., van Groenigen, J. W., y Brussaard L. (2018). "Soil Quality – A Critical Review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-25. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.
- Burst, M., Chauchard, S., Dambrine, E., Dupouey, J.L. y Bernard, A. (2020). Distribution of soil properties along forest-grassland interfaces: Influence of permanent

- environmental factors or land-use after-effects? *Agric. Ecosyst. Environ.*, 289, 106739. Doi: 10.1016/j.agee.2019.106739
- Cabrera-Pérez, S., Ochoa-Gaona, S., Mariaca-Méndez, R., González-Valdivia, N., Guadarrama-Olivera, M. de los Á., y Gama, L. (2013). Vulnerabilidad por aprovechamiento y distribución de especies leñosas desde la perspectiva comunitaria en la Reserva Cañón del Usumacinta, Tabasco, México. *Polibotánica*, 35, 143-172. <https://polibotanica.mx/index.php/polibotanica/article/view/408>
- Camacho-Olmedo, M. T., Molero-Melgarejo, E. y Paegelow, M. (2010). *Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio*. En: Ojeda, J., Pita, M. F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 658-678. ISBN: 978-84-472-1294-1
- Castelán-Vega, R., Tamaríz-Flores, V., Ruiz-Careaga, J., y Linares-Fleites, G. (2014). Evaluación de la sustentabilidad de la actividad agrícola de tres localidades campesinas en Pahuatlán, Puebla. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 1(3), 219-231. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=358633238003>
- Castro, J. P., Babos, D. V., y Pereira-Filho E. R. (2020). Calibration strategies for the direct determination of rare earth elements in hard disk magnets using laser-induced breakdown spectroscopy. *Talanta*, 208:120443. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120443>.
- Celorio-Cacep, J. C. Berúmen-Alatorre, A. C., y Ramírez-Vera, S. (2021). Evaluación Económica De Una Unidad Bovina Doble Propósito En El Trópico Húmedo. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 49,1-9. <https://www.redalyc.org/journal/141/14169723002/>
- Chamorro, A. M., y Sarandón, S. J. (2021). Evaluación de la sustentabilidad de tres secuencias de doble cultivo en el partido de Tres Arroyos (Argentina) bajo diferentes condiciones de suelo y nivel tecnológico. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 120 (2), 1-16. Recuperado de <https://revistas.unlp.edu.ar/revagro/article/view/13016>

- Chuvienco, E. (2002). *Teledetección ambiental* (3a ed.). Barcelona: Ediciones Ariel.
- Cipriano-Anastasio, J., López-Mancilla, A., Cabrera-Martínez, D., y Capistrán-Barradas, A. (2017). Riqueza y diversidad de aves en un paisaje Agropecuario en el ejido Chalahuiyapa, Huejutla, Hidalgo. *Revista Científica Biológico-Agropecuaria Tuxpan* 5, (1), 105-110.
<https://revistabioagro.mx/index.php/revista/article/view/100>
- Colegio de Postgraduados (COLPOS). (1991). *Manual de conservación del suelo y el agua*. COLPOS, SARH. Chapingo, Mex. 225 p.
- Comisión Estatal Forestal (COMESFOR). (2015). *Programa Especial de Desarrollo Forestal 2013-2018*. Recuperado de https://tabasco.gob.mx/sites/default/files/09_Programa_especial_df.pdf
- Comisión Nacional de los Salarios Mínimos (CONASAMI). (2021). *Salarios mínimos vigentes a partir del 01 de enero de 2021*
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/602096/Tabla_de_salarios_minimos_vigente_a_partir_de_2021.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Monitor de sequía de América del Norte*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Congedo, L. (2016). *Semi-Automatic classification plugin documentation*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). 2018. *Anexo único de los "lineamientos y criterios generales para la definición, identificación y medición de la pobreza*.
<https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Lineas-de-Pobreza-por-Ingresos.aspx>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (2020). *Avances y retos del programa crédito ganadero a la palabra. Comunicado No.16*. Ciudad de México. Recuperado de https://www.coneval.org.mx/SalaPrensa/Comunicadosprensa/Documents/2020/COMUNICADO_16_PROGRAMA_CREDITO_GANADERO_A_LA_PALABRA.pdf

- Cortés-Calderón, S., Mora, F., Arreola-Villa, F., y Balvanera, P. (2021). Ecosystem services supply and interactions along secondary tropical dry forests succession. *Forest Ecology and Management*, 482, 118858. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118858>
- Couto-Júnior, A. A., Conceição T. F., Fernandes M. A., Spatti J. P. E., Lupinacci C. M., y Braga M. R. (2019). Land use changes associated with the expansion of sugar cane crops and their influences on soil removal in a tropical watershed in São Paulo State (Brazil). *Catena*, 172, 313-323. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.001>
- Damián-Huato, M. A., Romero-Arenas, O., Sangerman-Jarquín, D. M., Reyes-Muro, L., Parraguirre-Lezama, C., y Orozco-Cirilo, S. (2016). Maíz, potencial productivo y seguridad alimentaria: el caso de San Nicolás de Los Ranchos, Puebla-México. *Nova scientia*, 8(16), 352-370. Recuperado de <http://novascientia.delasalle.edu.mx/ojs/index.php/Nova/article/view/420/276>
- De Freitas, L., Filho, V. M., Casagrande, J. C., De Oliveira I. A., y Da Silva G. (2018). Soil quality indicator of oxisols grown with sugarcane and native forest in northeastern São Paulo, Brazil. *Environ. Earth Sci.*, 77, 642. Doi: 10.1007/s12665-018-7830-7
- De la Peña-Domene, M., Ayestarán-Hernández, L. M., Márquez-Torres, J. F., Martínez-Monroy, F., Rivas-Alonso, E., Carrasco-Carballido, P. V., Pérez-Cruz, M. N., Chang-Landa, F. A., y Martínez-Garza, C. (2022). Sistemas silvopastoriles enriquecidos: una propuesta para integrar la conservación en la producción ganadera en comunidades rurales de Los Tuxtlas, México. *Acta botánica mexicana*, 129, e1925. <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1925>
- Demattê, M. J. A., Dotto, C. A., Bedin, L. G., Sayão, V. M., Barros A., y Souza, B. A. (2019). Soil analytical quality control by traditional and spectroscopy techniques: Constructing the future of a hybrid laboratory for low environmental impact. *Geoderma*, 337, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.010>
- Dhar, R. B., Chakraborty, S., Chattopadhyay, R., y Sikdar, P. K. (2019). Impact of land-use/land-cover change on land surface temperature using satellite data: a case

- study of Rajarhat Block, North 24-Parganas District, West Bengal. *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 47, 331-348. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-00939-1>
- Dorji, T., Odeh, I. O. A., y Field, D. J. (2015). Elucidating the complex interrelationships of soil organic carbon fractions with land use/land cover types and landform attributes in a montane ecosystem. *J. Soils Sediments*, 15:1039-1054. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1088-4>
- Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., y Grêt-Regamey, A. (2018). Soil quality indicators- From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 94, 1, 151-169.
- Eastman, J. R. (2016). *TerrSet Manual*. Clark labs, Clark University, Worcester, USA. Retrieved from <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/Terrset-Manual.pdf>
- Eastman, J. R., y Toledano, J. (2018). *A Short Presentation of the Land Change Modeler (LCM)*. In: Camacho Olmedo, M., Paegelow, M., Mas, J. F., Escobar, F. (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_36
- Enríquez-Quiroz, J. F., Esqueda Esquivel, V. A., y Martínez Méndez, D. (2021). Rehabilitación de praderas degradadas en el trópico de México. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 12(3), 243-260. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5876>
- Esquivel-Valenzuela, B., Cueto-Wong, J. A., Cruz-Gaistardo, C. O. Guerrero-Peña, A., Jarquín-Sánchez, A., y Burgos-Córdova, D. (2018). Carbono orgánico y nitrógeno total en suelos forestales de México mediante espectroscopia VIS-NIR. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 295-313. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.158>
- Estrada-Loreto, F., Barba-Macias, E., y Ramos-Reyes, R. (2013). Cobertura temporal de los humedales en la cuenca del Usumacinta, Balancán, Tabasco, México. *Universidad y ciencia*, 29(2), 141-151. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v29n2/v29n2a4.pdf>

- Eynard, A. Schumacher T. E., Lindstrom J.M., y Malo, D. D. (2004). Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie ustolls and usterts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1360-1365. Doi: 10.2136/sssaj2004.1360
- Fernández, de A. L. (2014). Aplicación del índice de estabilidad estructural de Pieri (1995) a suelos montañosos de Venezuela. *Terra. Nueva Etapa*, XXX (48),143-153. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72132517007>
- Fernández, L., González, M., y Sáez S. V. (2016). Relación entre un índice de estabilidad estructural de suelo, la zona bioclimática y la posición fisiográfica en Venezuela. *Terra. Nueva Etapa*, XXXII (52),139-149. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72148468006>
- Fonseca-Carreño, J. A., Cleves-Leguízamo, J. A., y Leon-Sicard, T. E. (2015). Evaluación de la sustentabilidad de agroecosistemas familiares campesinos en la microcuenca del río Cormechoque (Boyacá). *Revista Ciencia y Agricultura*, 13(1), 29-47. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5560526>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS). (2015). *Status of de world´s soil resources*. Italy Technical Summary. Rome, Italy. 79 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) y United Nations Environment Programme (PNUMA). (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020*. Los bosques, la biodiversidad y las personas. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020: Key findings*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/CA8753EN/CA8753EN.pdf>.
- Franco, W., Peñafiel, M., Cerón C., y Freire, E., (2016). Biodiversidad productiva y asociada en el Valle Interandino Norte del Ecuador. *Bioagro*, 28,3. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612016000300005
- Fuentes, M., González-Martín, I., Hernández-Hierro, J. M., Hidalgo, C., Govaerts, B., Etchevers, J., Sayrec, K. D. y Dendooven. L. (2009). The natural abundance of ¹³C

- with different agricultural management by NIRS with fibre optic probe technology. *Talanta* 79:32–37. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.03.002>.
- Fuentes, M., Hidalgo, C., González-Martín, I., Hernández-Hierro, J. M., Govaerts, B., Sayre, K. D., y Etchevers. J. (2012). NIR Spectroscopy: An Alternative for Soil Analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43:1-2:346-356, <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.641471>.
- García-Ortega, M. (2013). Migraciones laborales, derechos humanos y cooperación internacional: Cortadores de caña centroamericanos en la frontera México-Belice. *Trace*, 63, 07-23. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/trace/n63/n63a2.pdf>
- Geissen, V. R. Sánchez-Hernández, R., Kampichler, C., Ramos-Reyes, R., Sepulveda, L. A., Ochoa-Goana, S., y Hernández D. S. (2009). Effects of land-use change on some properties of tropical soils: an example from Southeast Mexico. *Geoderma*, 151(3-4), 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.011>
- Gozukara, G., Acar, M., Ozlu, E., Dengiz, O., Hartemink, A. E., y Zhang, Y. (2022). A soil quality index using Vis-NIR and pXRF spectra of a soil profile. *Catena*, 211, 105954. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105954>.
- Granados-Rivera, L. D., Quiroz-Valiente, J., Maldonado-Jáquez, J. A., Granados-Zurita, L., Díaz-Rivera, P., y Oliva-Hernández, J. (2018). Caracterización y tipificación del sistema doble propósito en la ganadería bovina del Distrito de Desarrollo Rural 151, Tabasco, México. *Acta universitaria*, 28(6), 47-57. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1916>
- Gruszczynski, S., y Gruszczynski, W. (2022). Supporting soil and land assessment with machine learning models using the Vis-NIR spectral response. *Geoderma*, 405: 115451. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115451>.
- Guevara, Z. R., y Vásquez, R. E. (2019). Caracterización y evaluación de la sustentabilidad de fincas cafetaleras en la localidad de Nuevo Chirimoto, Rodríguez de Mendoza-Región Amazonas. *Revista Pakamuros*, 7(1), 46-55. Recuperado de <http://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros/article/view/75>

- Gutiérrez-San-Pallo, M., Ramos-Muñoz, D., Mesa-Jurado, M., y Díaz-Perera, M. (2019). Informes de gobierno y paisaje forestal en Tabasco y Chiapas de 1947-1982. *Entre Diversidades*, 62(13), 233-262. <https://doi.org/10.31644/ED.V6.N2.2019.A08>
- Hamunyela, E., Brandt, P., Shirima, D., Thanh Do H. T., Herold M., y Roman-Cuesta, R. M. (2020). Space-time detection of deforestation, forest degradation and regeneration in montane forests of Eastern Tanzania. *Int. J. Appl. Earth. Obs. Geoinf.*, 88, 102063. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102063>
- Hasan, S. S., Zhen, L., Miah, M. G., Ahamed, T., y Samie, A. (2020). Impact of land use change on ecosystem services: A review. *Environ. Dev. Sustain.*, 34, 100527. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100527>
- Hayhoe, D. (2013). *Surprising Facts About Soils, Students and Teachers! A Survey of Educational Research and Resources*. In: Lichtfouse, E. (eds) Sustainable Agriculture Reviews. Sustainable Agriculture Reviews, 12. Springer. Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5961-9_1
- Hernández-Rojas, D. A., López-Barrera, F., y Bonilla-Moheno, M. (2018). Análisis preliminar de la dinámica de uso del suelo asociada al cultivo palma de aceite (*Elaeis guineensis*) en México. *Agrociencia*, 52(6), 875-893. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v52n6/2521-9766-agro-52-06-875.pdf>
- Iglesias-Gómez, J. M., Toral-Pérez, O. C. y Rodríguez-Licea, G. (2022). Evaluación de la biodiversidad en una finca en transición agroecológica. *Terra-Latinoamericana*, 40, 1-12. e957. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.957>
- Iglesias-Gómez, J. M., Toral-Pérez, O. C. y Rodríguez-Licea, G. (2022). Evaluación de la biodiversidad en una finca en transición agroecológica. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.957>
- Imbellone, P. A., Giménez, J. E., y Panigatti J. L. (2010). *Suelos de la Región Pampeana: procesos de formación*. Ed. IMTA. Buenos Aires. 320 pp. Recuperado de <https://inta.gov.ar/documentos/suelos-de-la-region-pampeana.-procesos-de-formacion>.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1984). *Carta de uso de suelo y vegetación de Tenosique, Tabasco, escala 1:250000*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001). *Carta de uso de suelo y vegetación de Tenosique, Tabasco, escala 1:250000*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Tabasco*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825095123.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000: serie VI*. México. 204 p. Recuperado de <https://www.google.com/search?client=firefox-d&q=clasificacion+de+uso+de+suelo+del+inegi>
- Isaac-Márquez, R., Bernardus, J., Amarella, E., Ochoa-Gaona, S., Hernández, S., y Sandoval, J. L. (2008). Programas gubernamentales y respuestas campesinas en el uso del suelo: el caso de la zona oriente de Tabasco, México. *Región y Sociedad*, 20(43), 99-129. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/regsoc/v20n43/v20n43a4.pdf>
- Isaac-Márquez, R., De-Jong, B., Eastmond, A., Ochoa-Gaona, S., Hernández, S., y Kantún, M. D. (2005). Estrategias productivas campesinas: un análisis de los factores condicionantes del uso del suelo en el oriente de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 21(42), 57-73. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2339215>
- Jácome, J., Rodríguez, A., y Hernández-Maqueda, R. (2020). Sustainability assessment of natural resource management in the Yungañan river micro-basin in the Ecuadorian Andes. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23 (100),1-14. Recuperado de <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3414>

- Jarquín-Sánchez, A., Salgado-García, S., Palma-López, D. J., Camacho-Chiu, W., y Guerrero-Peña, A., (2011). Análisis de nitrógeno total en suelos tropicales por espectroscopía de infrarojo cercano (NIRS) y quimiometría. *Agrociencia* 45, 653-662.
- Javadi, H. S., Munnaf, M. A., y Mouazen, M. A. (2021). Fusion of Vis-NIR and XRF spectra for estimation of key soil attributes. *Geoderma*, 385:114851. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114851>.
- Jian, J., Du, X., y Stewart, R.D. (2020). A database for global soil health assessment. *Scientific. Data*, 7, 16. Doi: 10.1038/s41597-020-0356-3
- Jin, V. L., Wienhold, B. J., Mikha, M. M. y Schmer, R.M. (2021). Cropping system partially offsets tillage-related degradation of soil organic carbon and aggregate properties in a 30-yr rainfed agroecosystem. *Soil Tillage Res.*, 209, 104968. Doi: 10.1016/j.still.2021.104968
- Jumbo-Benítez, M., Fernández-Guarnizo, P., Guevara-Pérez, A., y Julca-Otiniano, A. (2021). Sustentabilidad de las fincas cafetaleras de la asociación de productores agropecuarios del cantón Chaguarpamba. *Bosques Latitud Cero*, 10(2), 111–123. Recuperado de <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/859>
- Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tiftonell, P., Smith, P., Cerdà, Montanarella, L., Quinton N.J., Pachepsky, Y., Van der Putten, W.H., Bardgett, R.D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B., y Fresco, L.O. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *Soil*, 2: 111-128. Doi: 10.5194/soil-2-111-2016
- Kriesemer, S. K., Virchow D., y Weinberger K. M. (2016) *Assessing the Sustainability of Agricultural Technology Options for Poor Rural Farmers*. In: Gatzweiler F., von Braun J. (eds) *Technological and Institutional Innovations for Marginalized Smallholders in Agricultural Development*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25718-1_12
- Levi, N., Karnieli, A., y Paz-Kagan, T. (2020). Using reflectance spectroscopy for detecting land-use effects on soil quality in drylands. *Soil and Tillage Research*, 199, 104571. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104571>.

- Lin, C. H., Tsai, P. H., Lai, K. H., y Chen, J. Y. (2013). Cloud removal from multitemporal satellite images using information cloning". *IEEE Trans Geosci. Remote. Sens.*, 51(1), 232-241. [10.1109/TGRS.2012.2197682](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2197682)
- Liu, J., Xie, J., Han, J., Wang, H., Sun, J., Li, R., y Li, S. (2020). Visible and near-infrared spectroscopy with chemometrics are able to predict soil physical and chemical properties. *J. Soils Sediments* 20, 2749-2760. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02623-1>.
- Liu, W., Zhan, J., Zhao, F., Yan, H., Zhang F., y Wei X. (2019). Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: A case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China. *Ecological Indicators*, 98, 228. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.054>
- Lone, S. A., y Mayer, I. A. (2019). Geo-spatial analysis of land use/land cover change and its impact on the food security in District Anantnag of Kashmir Valley. *Geo Journal*, 84, 785-794. <https://doi.org/10.1007/s10708-018-9891-2>
- López-Castañeda, A., Palma-López, D. J., Zavala-Cruz, J., Ortiz-Solorio, C. A., Tinal-Ortiz, S., y Valdez-Lazalde, J. R. (2017). Cartografía de suelos en la región de Los Ríos, Tabasco, México; uso del modelo digital de elevación. *Agroproductividad*, 10(12), 22-28. Recuperado de <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/32>
- López-Mendoza, R. (1980). *Tipos de vegetación y su distribución en el estado de Tabasco y norte de Chiapas*. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- López-Pérez, D., Castillo-Acosta, O., Zavala-Cruz, J., y Hernández-Trejo, H. (2014). Estructura y composición florística de la vegetación secundaria en tres regiones de la Sierra Norte de Chiapas, México. *Polibotánica*, 37, 1-23. Recuperado de <https://polibotanica.mx/index.php/polibotanica/article/view/347>
- Lopo, M., Dos Santos, T., Páscoa, R. N. M. J. Graça, A. R., y Lopes, J. A. (2018). Near infrared spectroscopy as a tool for intensive mapping of vineyards soil. *Precision Agric.*, 19, 445-462. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9529-2>.
- Manjarrez-Muñoz, B., Hernández Daumás, S., de Jong, B., Nahed Toral, J., Dios Vallejo, O. O., y Salvatierra-Zaba, E. B. (2007). Configuración territorial y perspectivas de

- ordenamiento de la ganadería bovina en los municipios de Balancán y Tenosique, Tabasco. *Investigaciones geográficas*, 64, 90-115. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56906407>
- Mekasha, S. T., Suryabhadgavan, K. V., y Gebrehiwot, M. (2020). Geo-spatial approach for land-use and land-cover changes and deforestation mapping: a case study of Ankasha Guagusa, Northwestern, Ethiopia. *Trop. Eco.*, 61, 550-569. <https://doi.org/10.1007/s42965-020-00113-6>
- Merma, I., y Julca, A. (2012). Caracterización y evaluación de la sustentabilidad de fincas en alto Urubamba, Cusco, Perú. *Ecología Aplicada*, 11(1), 1-11. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=34123961001>
- Mirghaed, F. A., y Sourì, B. (2022). Spatial analysis of soil quality through landscape patterns in the Shoor River Basin, Southwestern Iran. *Catena*, 211,106028. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106028>.
- Moreno-Jiménez, V., Castillo-Acosta, O., Gama-Campillo, L., Zavala-Cruz, J., y Ortiz-Pérez, M. A. (2017). Relación de vegetación ribereña y propiedades del suelo en un afluente del río Tacotalpa, Tabasco, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 91-109. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61750015008>
- Mozo-Ocegueda, A., y Silva-Aparicio, M. (2022). Caracterización del aprovechamiento de leña en una comunidad Me'phaa de la Montaña de Guerrero. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 13(70). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i70.1263>
- Mukhopadhyay, S., Maiti, S. K., y Mastro, R. E. (2014). Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: a chronosequence study. *Ecol. Eng.* 71, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.001>.
- Mulat, Y., Kibret, K., Bedadi B., y Mohammed M. (2021). Soil quality evaluation under different land use types in Kersa sub-watershed, eastern Ethiopia. *Environ. Syst. Res.*, 10, 19. Doi: 10.1186/s40068-021-00224-6
- Muñoz-Espinoza, M., Artieda-Rojas, J., Espinoza-Vaca, S., Curay-Quispe, S., Pérez-Salinas, M., Núñez-Torres, O., Mera-Andrade, R., Zurita-Vásquez, H., Velástegui-Espín, G., Pomboza-Tamaquiza, P., Carrasco-Silva, A., y Barros-Rodríguez, M. (2016). Granjas sostenibles: integración de sistemas agropecuarios. *Tropical and*

- Subtropical Agroecosystems*, 19(2), 93-99. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93946928013>
- Muñoz-Rojas, M. (2018). Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007>.
- Mwampamba, T. H., y Schwartz M. W. (2011). The effects of cultivation history on forest recovery in fallows in the Eastern Arc Mountain, Tanzania. *For. Ecol. Manage.*, 261(6), 1042-1052. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.12.026>
- Nair, P. K. R., y Toth G. G. (2016) *Measuring Agricultural Sustainability in Agroforestry Systems*. In: Lal R., Kraybill D., Hansen D., Singh B., Mosogoya T., Eik L. (eds) *Climate Change and Multi-Dimensional Sustainability in African Agriculture*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41238-2_20
- Navarro-García, G., y Navarro-García, S. (2013). *Química agrícola. 3ra edición*. Ed. Mundi-prensa. 493 pp.
- Nespeca, M. G., Piassalonga, G. B., y de Oliveira, J. E. (2018). Infrared spectroscopy and multivariate methods as a tool for identification and quantification of fuels and lubricant oils in soil. *Environ. Monit. Assess.*, 190(2), 72. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6454-9>.
- Obade, V. D. P., y Lal R. (2013). Catena assessing land cover and soil quality by remote sensing and geographical information systems (GIS). *Catena*, 104, 77-92. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.014>
- Obodaia, J., Adjei, A. K., Odaia, N. S., y Lumor, M. (2019). Land use/land cover dynamics using landsat data in a gold mining basin-the Ankobra, Ghana. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13, 247-256. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.10.007>
- Obrador-Olán, J. J., García-López, E. Almeyda-Santos, L. M., Castelán-Estrada, M., y Carrillo-Ávila, E. (2019). Weeds in a Sugar Cane Soil Cultivated with *Crotalaria juncea*. *Planta Daninha*, 37, e019171505. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100002>

- Ortiz-Palomeque, G., y Galmiche-Tejeda, A. (2021). *Los medios de vida de los productores cañeros de Tenosique, Tabasco*. En *Medios de vida en las comunidades rurales de Tabasco y Veracruz: Intervenciones sociales y vulnerabilidad*. Galmiche-Tejeda, A., Solana-Villanueva, S., y Martínez-Arboleya H. J. Dirección de Extensión y Difusión Cultural. 54-94 p. <https://revistas.ujat.mx/index.php/hitos/article/view/5184/3840>
- Ortiz-Solorio, C. A., Gutiérrez, C.M.C., Sánchez-Guzmán, P., y Gutiérrez-Castorena, E.V. (2011). *Cartografía de la degradación de suelos en la República Mexicana: evolución y perspectivas*. En: Krasilnikov, P., Jiménez-Nava, F. J., Reyna-Trujillo, T., & García-Calderón, N.E. *Geografía de suelos de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Distrito Federal. 462 p.
- Pain, A., Marquardt, K., Lindh, A., y Hasselquist, N. J. (2021). What Is Secondary about Secondary Tropical Forest? Rethinking Forest Landscapes. *Hum. Ecol.* 49, 239-247. <https://doi.org/10.1007/s10745-020-00203-y>
- Palacios-Sánchez, J. E., Mejía-Saenz, E., Oropeza Mota, J. L., Martínez-Menes, M. R., y Figueroa-Sandoval, B. (2009). Impacto de las actividades económicas en los recursos suelo y vegetación. *Terra-Latinoamericana*, 27(3), 247-255. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57313037009>
- Palma-López, D. J., Cisneros, D. J., Moreno, C. E., y Rincón-Ramírez, J. A. (2007). *Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable*. Colegio de Postgraduados, ISPROTAB, FUPROTAB. Villahermosa, México. 195 p.
- Palma-López, D. J., Moreno C. E., Rincón-Ramírez, J. A., y Shirma, T. E. D. (2008). *Degradación y conservación de los suelos del estado de Tabasco*. Colegio de Postgraduados, CONACYT, CCYTET. Villahermosa, Tabasco, México. 74 p.
- Pang, J. Liu, X., y Huang. (2020). A new quality evaluation system of soil and water conservation for sustainable agricultural development. *Agricultural Water Management*, 240:106235. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106235>
- Peña, J., Alegre, J., y Bardales, R. (2018). Efecto de la riqueza de las especies cultivadas en la sustentabilidad de los sistemas agroforestales en la Amazonia Sur del Perú. *Ecosistemas*, 27(3): 87-95. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1522>

- Perret, J., Villalobos-Leandro, J. E., Abdalla-Bolaños, K., Fuentes-Fallas, C. L., Cuarezma-Espinoza, K. M., Macas-Amaya, E. N., López-Maietta, M. T., y Darren, D. (2020). Desarrollo de métodos de análisis de espectroscopia y algoritmos de aprendizaje automático para la evaluación de algunas propiedades del suelo en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 44,2. [https://doi: 10.15517/RAC.V44I2.43108](https://doi.org/10.15517/RAC.V44I2.43108).
- Pineda-Jaimes, N. B., Bosque-Sendra, J., Gómez-Delgado, M., y Plata-Rocha, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas*, 69, 33-52. <https://doi.org/10.14350/rig.18003>
- Pinedo-Taco, R., Borjas-Ventura, R., Alvarado-Huamán, L., Castro-Cepero, V., y M. Julca-Otiniano, J. (2021). Sustentabilidad de los sistemas de producción agrícola: una revisión sistemática de las metodologías empleadas para su evaluación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24 (01), 1-16. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3292>
- Pouladi, N., Jafarzadeh, A.A., Shahbazi, F. Ghorbani, M.A., y Greve, M.H. (2020). Assessing the soil quality index as affected by two land use scenarios in Miandoab region. *Appl. Sci.* 2:1875. Doi: 10.1007/s42452-020-03651-9
- Purroy-Vásquez, R., Gallardo-López, F., Diaz-Rivera, P., Ortega-Jiménez, E., López-Ortiz, S., y Torres-Hernández, G. (2016). flujo energético-económico como herramienta para tipificar agroecosistemas en el centro del estado de Veracruz, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(7),91-101. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=358643620009>
- Ramírez, L., Alvarado, A., Pujol, R., McHugh, A., y Brenes, L. G. (2008). Indicadores para estimar la sostenibilidad agrícola de la cuenca media del río Reventado, Cartago, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 32(2),93-118. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43632206>.
- Ramírez-García, A. R., Zavala-Cruz, J., Guerrero-Peña, A., Carrillo-Ávila E., Sánchez-Hernández, R., Rincón-Ramírez, J. A., y García-López, E. (2022b). Calidad de un

- Cambisol con diferente tiempo de uso agropecuario en la región Los Ríos, Tabasco, México.
- Ramírez-García, A. R., Zavala-Cruz, J., Rincón-Ramírez, J. A., Guerrero-Peña, A., García-López, E., Sánchez-Hernández, R., y Ortiz-Pérez, M. A. (2022a). Vegetation cover and land use change (1947-2009) in the region of Los Ríos, Tabasco, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(3), 465-481. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.01.001>
- Ramírez-Iglesias, E., Hernández-Hernández, R.M., y Herrera, P. (2017). Dinámica del fósforo en un agroecosistema maíz-ganado de sabanas neotropicales. *Rev. Colombiana Cienc. Anim. Recia*, 9(2): 147-157. Doi: 10.24188/recia.v9.n2.2017.552
- Ramos-Reyes, R., Palomeque-De la Cruz, M. A., Megía-Vera, H. J., y Landeros-Pascual, D. (2021a). Modelo del cambio de uso de suelo en el sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona, México. *Terra Latinoamericana*, 39, e587. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.587>
- Ramos-Reyes, R., Palomeque-De la Cruz, M. Á., y Zavala-Cruz, J. (2021b). Impacto de las actividades agropecuarias y petroleras sobre las coberturas naturales del campo petrolero Samaria, Tabasco. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(8), 1429-1443. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2767>
- Ranagalage, M, Gunarathna, M, Surasinghe, H. J. P, Dissanayake, T. D, Simwanda, D, Murayama, M, Morimoto, Y., Phiri, T., Nyirenda, D., Premakantha, V.R., Sathurusinghe, A. (2020) Multi-decadal forest-cover dynamics in the tropical realm: past trends and policy insights for forest conservation in dry zone of Sri Lanka. *Forests* 11:836. <https://doi.org/10.3390/f11080836>
- Recena, R., Fernández-Cabanás, V. M., y Delgado, A. (2019). Soil fertility assessment by Vis-NIR spectroscopy: Predicting soil functioning rather than availability indices. *Geoderma*, 337, 368-374. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.049>
- Reyes-Grande, F. (2015). ¿Sustentabilidad versus subsistencia? Un estudio de caso dentro del Área Natural Protegida Cañón del Usumacinta. *Relaciones. Estudios*

- de Historia y Sociedad*, XXXVI(142), 261-305. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=13739406008>
- Rodríguez, N. F. y F. Burguete H. (1987). *Muestreo de suelos*. In A. Aguilar S., J. D. Etchvers B. y J. Z. Castellanos R. (eds.). Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Publicación Especial No. 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Rojas, F., Rubio, C., Rizzo, M. Bernabeu, M. Akil, N., y Martin, F. (2020). Land use and land cover in irrigated drylands: a long-term analysis of changes in the Mendoza and Tunuyán river basins, Argentina (1986–2018). *Appl. Spatial Analysis*, 13, 875-899. <https://doi.org/10.1007/s12061-020-09335-6>
- Rosa, M. D. I., Smith, M. J., Wearn, O. R., Purves, D., y Ewers, R. M. (2016). The Environmental Legacy of Modern Tropical Deforestation. *Current Biology*, 26(16), 2161-2166. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.06.013>
- Rosete-Vergés, F. A., Pérez-Damián, J. L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E. N., Salinas-Chávez, E., y Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y bosques* 20(1), 21-35. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v20n1/v20n1a3.pdf>
- Salgado-García, S., Palma-López, D. J., Lagunes-Espinoza, J., y Castelán-Estrada, M. (2006). *Manual para el muestreo de suelos, plantas y aguas e interpretación de análisis*. Colegio de postgraduados, Campus Tabasco- ISPROTAB. H. Cárdenas, Tabasco, México. 90 p.
- Salgado-García, S., Palma-López, D. J., Zavala-Cruz, J., Lagunes-Espinoza, L. C., Córdova-Sánchez, S., Castelán-Estrada M., y Martínez-Becerra, A. (2017). *Recomendaciones de fertilizantes en palma de aceite en la Región de los Ríos de Tabasco*. Colegio de postgraduados. H. Cárdenas, Tabasco, México.
- Salgado-Sánchez, R. (2015). Agricultura sustentable y sus posibilidades en relación con consumidores urbanos. *Estudios sociales* 23(45), 113-140. <https://doi.org/10.24836/es.v23i45.184>
- Sánchez, M. A. (2005). *Uso del suelo agropecuario y deforestación en Tabasco 1950-2000*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. 1era Ed. Villahermosa,

- Tabasco, México. 123 p. Retrieved from <https://books.google.es/books?id=4DVyMyAOWhEC>
- San-Pallo, M. G., Ramos-Muñoz, D. E., Mesa-Jurado, M. A., y Díaz-Perera, M. A. (2019). Informes de gobierno y paisaje forestal en Tabasco y Chiapas de 1947 a 1982. *Entre diversidades*, 2(13), 233-262. <https://doi.org/10.31644/ED.V6.N2.2019.A08>
- Sarandón, S. J Soledad-Zuluaga, M., Cieza, R., Janjetic, L., y Negrete, E. (2006). Evaluación de la sustentabilidad de sistemas agrícolas de fincas en misiones, Argentina, mediante el uso de indicadores. *Agroecología*, 1, 19-28. Recuperado de <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/14>
- Sarandón, S. J., y Flores, C. C. (2009). Evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas: Una propuesta metodológica. *Agroecología* 4,19-28. Recuperado de <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/117131>
- Satya, A., Shashi, M., y Deva, P. (2020). Future land use land cover scenario simulation using open source GIS for the city of Warangal, Telangana. India. *Appl Geomat.*, 12, 281-290. <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00298-4>
- Schlöter, M., Nannipieri, P., Sørensen, S.J., y Van Elsas J.D. (2018). Microbial indicators for soil quality. *Biol. Fertil. Soils*, 54, 1-10. Doi: 10.1007/s00374-017-1248-3
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000*, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. México. Disponible en: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/1/nom-021-semarnat-2000.pdf>
- Sewnet, A., y Abebe G. (2018). Land use and land cover change and implication to watershed degradation by using GIS and remote sensing in the Koga watershed, North Western Ethiopia. *Earth Science Informatics*, 11, 99-108. <https://doi.org/10.1007/s12145-017-0323-5>
- Shah, S. M., Liu, G., Yang, Q., Casazza, M., Agostinho, F., y Giannetti, B. F. (2021). Sustainability assessment of agriculture production systems in Pakistan: A provincial-scale energy-based evaluation. *Ecological Modelling*, 455,109654. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109654>

- Silva-Santamaría, L., y Ramírez-Hernández, O. (2017). Evaluación de agroecosistemas mediante indicadores de sostenibilidad en San José de las Lajas, provincia de Mayabeque, Cuba. *Luna Azul*, 44, 120-152. DOI: 10.17151/luaz.2017.44.8.
- Singh, R. K., Murty, H.R., Gupta, S.K., y Dikshit, A.K. (2012). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 15(1), 281-299. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>
- Soares, L. C., Alves, J. de O., Linhares, L. A., Filho, E. F. B., y Fontes, P. F. M. (2017). Vulnerability of tropical soils to heavy metals: A PLS-DA classification model for Lead. *Microchemical Journal*, 133, 258-264. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.03.028>.
- Soto-Pinto, L., Anzueto-Martínez, M., y Sotero, Q. (2015). *El acahual mejorado un prototipo agroforestal*. p 28. ECOSUR. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/284300182>
- Soulé, E., Michonneau, P., Michel, N., y Bockstaller, C. (2021). Environmental sustainability assessment in agricultural systems: A conceptual and methodological review. *Journal of Cleaner Production*, 325, 129291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129291>
- Tahmasebi, T., Karami, E., y Keshavarz, M., (2020). Agricultural land use change under climate variability and change: Drivers and impacts. *Journal of Arid Environments*, 180, 104202. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104202>
- Tarawally, M., Wenbo, X., Weiming, H., Mushore, D. T., y Kursu, M.B. (2019). Land use/land cover change evaluation using land change modeller: A comparative analysis between two main cities in Sierra Leone. *Sensor Remoto Aplic.: Soc. Reinar.*, 16, 100262. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100262>
- Tassano, M., Montañez, A., Nuñez, L., Trasante, T., González, J., Irigoyen, J., Cabrera, M. Cabral, P., y Cabrera, M. (2021). Spatial cross-correlation between physicochemical and microbiological variables at superficial soil with different levels of degradation. *Catena*, 198: 105000. Doi: 10.1016/j.catena.2020.105000

- Tian, D., y Niu, S. (2015). A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 10(2), 024019. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/2/024019/meta>
- Trujillo-Ubaldo, E., Álvarez-López, P. S., Valdovinos-Chavez, V. R., Benítez-Molina, G., y Rodríguez-Gonzales, L. O. (2018). Turnos forestales en plantaciones maderables de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, en Balancán, Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9, 48. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.130>
- United States Department of Agriculture [USDA] (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. 1-88 pp. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051913.pdf
- United States Geological Survey [USGS] (2019). EarthExplorer en: 2019. <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Accedido 20 febrero 2019.
- Valdez, M. C. G., Guzmán, L. M. A., Valdés, G. A., Forougbakhch, P. R., Alvarado, V., M. A., y Rocha, E. A. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación en un matorral espinoso prístino de Tamaulipas, México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1674-1682. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i4.32135>
- Vázquez-Negrín, I., Castillo-Acosta, O., Valdez-Hernández, J. I., Zavala-Cruz, J., y Martínez-Sánchez, J. L. (2011). Estructura y composición florística de la selva alta perennifolia en el ejido Niños Héroes Tenosique, Tabasco, México. *Polibotánica*, 32, 41-61. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/polib/n32/n32a3.pdf>
- Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., y Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, 62, 21-37. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906202>
- Vijay, V, Pimm, S. L, Jenkins, C. N., y Smith, S. J. (2016). The Impacts of Oil Palm on Recent Deforestation and Biodiversity Loss. *Ploss One*, 11(7), e0159668. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159668>
- Villanueva-Partida, C. R., Casanova-Lugo F., González-Valdivia, N. A., Villanueva-López, G., Oros-Ortega, I., Cetzal-Ix, W., y Basu K. S. (2019). Traditional uses of

- dispersed trees in the pastures of the mountainous region of Tabasco, Mexico. *Agroforestry Systems*, 93, 383-394. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0125-2>
- Wang, Ch., Li, L., Yan, Y., Cai, Y., Xu, D., Wang, X., Chen, J., y Xin, X. (2021). Effects of cultivation and agricultural abandonment on soil carbon, nitrogen and phosphorus in a meadow steppe in eastern Inner Mongolia. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 309:107284. Doi: 10.1016/j.agee.2020.107284
- Wu, X., Dang, X., Meng, Z., Fu, D., Cong, W., Zhao, F., y Guo, J. (2021). Mechanisms of grazing management impact on preferential water flow and infiltration patterns in a semi-arid grassland in northern China. *Sci. Total Environ.*, 152082. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152082
- Xu, A., Liu, J., Guo, Z., Wang, Ch., Pan, K., Zhang, F., y Pan, X. (2021). Soil microbial community composition but not diversity is affected by land-use types in the agro-pastoral ecotone undergoing frequent conversions between cropland and grassland. *Geoderma*, 401, 115165. Doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115165
- Yañez-Vazquez, A., Samano-Abonce, O., Santos-Olvera, O., y Ruiz-Barcenas, L. (2018). Análisis del sistema de transformación de datos Johnson para variables aleatorias no normales de distribución beta. *Rev. Anal. Cuant. y Est.*, 5:(14)12-18. Disponible en https://www.ecorfan.org/bolivia/rj_acye_xiv.php
- Young-Mathews, A., Culman, S.W., Sánchez-Moreno, O'Geen, T. A., Ferris, H., Hollander, A. D., y Jackson, E. L. (2010). Plant-soil biodiversity relationships and nutrient retention in agricultural riparian zones of the Sacramento Valley, California. *Agroforest Syst.*, 80, 41-60. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9332-9>
- Yulianto, F., Prasasti, I., Pasaribu, J. M., Fitriana H. L., y Zylshal-Haryani, N. S. (2016). The dynamics of land use/land cover change modeling and their implication for the flood damage assessment in the Tondano watershed, North Sulawesi, Indonesia. *Model. Earth Syst. Environ.*, 2, 47. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0100-3>
- Zamora-Crescencio, P., Rico-Gray, V., Ramírez-Medina, L. N. G., Barrientos-Medina, R. C., Plasencia Vázquez, A. H., Villegas, P., Domínguez-Carrasco, M. del R., y Gutiérrez-Báez, C. (2018). Composición y estructura de la vegetación secundaria

en Bethania, Campeche, México. *Polibotánica*, 45, 57-74.
<https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.5>.

Zavala-Cruz, J., y Castillo-Acosta, O. (2007). *Cambios de uso de la tierra en el estado de Tabasco*. In D. J. Palma-López & A. Triano-Sánchez (Eds.), Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco (vol. II, pp. 38–56). Villahermosa, Tabasco, México: Ed. COLEGIO DE POSTGRADUADOSISPROTAB. Retrieved from file:///C:/Users/CLIENTE/Downloads/PlandeusosustentabledelosSuelosdeTabascovol22007.pdf

Zhang, X., Yao, G., Vishwakarma, S., Dalin, C., Komarek, M. A., Kanter, R. D., Davis, K. F., Pfeifer, K., Zhao, J., y Zou, T., (2021). Quantitative assessment of agricultural sustainability reveals divergent priorities among nations. *One Earth*, 4(9), 1262-1277. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.08.015>

ANEXOS

Anexo I: Entrevista aplicada a productores para evaluar la sustentabilidad de usos agropecuarios de la región de Los Ríos, Tabasco, México.

Fecha _____

Entrevista número:

Uso del suelo:

Nombre: _____ Edad: _____ Localidad: _____

1.1. ¿Cuántas hectáreas de terreno tiene y cuantas utiliza para su cultivo?

1.2. ¿Hay emigración de los integrantes de la familia? (Si) o (No)

Si la respuesta es sí ¿Cuántos? ¿A dónde?

1.3. ¿Se generan empleos para los habitantes de la comunidad o la familia?

(Si) (No) ¿Cuántos empleos?

1.4. ¿Con qué grado de estudio cuenta?

a) Ninguno b) Prescolar c) Primaria d) Secundaria e) Media superior d) Superior

1.5. ¿Recibe apoyo de algún programa gubernamental?

(Si) (No) ¿Qué tipo de programa?

1.6. Lo que produce ¿Cubre sus necesidades básicas para vivir?

(Sí) (No) Si la respuesta es no ¿En que no es suficiente?

1.7. ¿Cómo es la recuperación del productor ante un evento eventos hidrometereológicos (huracanes, sequias, inundaciones, etc.) o provocados por el ser humano?

1.8. ¿Cuál es la productividad de su parcela en kg/ha? ¿granos, carne, leña, postes, medicinal, ornamental?

1.9. ¿Cuál es su ingreso por la producción?

1.10. De la producción que obtiene ¿Cuánto utiliza para su autoconsumo y cuanto para la venta?

Para autoconsumo: Para venta:

1.11. ¿Qué tipo de plantas tiene en su terreno (pastizal, cultivo, vegetación secundaria)?

1.12. ¿Utiliza plaguicidas?

(Si) (No). Si la respuesta es sí ¿Cuáles?

¿Cantidad por hectárea?

¿Cuántas veces por ciclo de cultivo?

1.13. ¿Utiliza fertilizantes?

(Si) (No) Si la respuesta es sí ¿Cuáles?

¿Cantidad por hectárea?

¿Cuántas veces por ciclo de cultivo?

1.14. ¿Realiza algún tipo de manejo del suelo cultivado? (ejemplo: barbecho; manejo de rosa-tumba-quema (cuantos años cultiva la milpa y cuantos años descansa el acahual, si realiza la quema), incorporación al suelo de residuos de cosecha al suelo; alternancia de cultivos como maíz y frijol (fija nitrógeno); aplicación de abonos orgánicos, estiércol, etc).

(Si) (No). Si la respuesta es sí, ¿Cómo lo hace?

1.15. ¿Cuál es el nombre que le da a la tierra de su milpa o potrero?

1.16. ¿Como califica a la tierra de su milpa o potrero para producir?

(Muy buena) (Buena) (Regular) (Mala). ¿Por qué?

Anexo II: Información de las entrevistas a productores sobre usos agropecuarios de la Región de Los Ríos, Tabasco.

Cuadro 2.1. Nivel de escolaridad de los entrevistados por uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| | | | |
|------------|------------------|----------|-------------------------------|
| Entrevista | Cultivo temporal | Pastizal | Vegetación Secundaria (VS) |
|------------|------------------|----------|-------------------------------|

| | (CT) | (P) | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Nivel de escolaridad | Nivel de escolaridad | Nivel de escolaridad |
| 1 | Media superior | Secundaria | Primaria |
| 2 | Secundaria | Secundaria | Media superior |
| 3 | Primaria | Primaria | Secundaria |
| 4 | Secundaria | Secundaria | Primaria |

Cuadro 2.2 Emigración familiar por uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entre -vista | Cultivo temporal (CT) | | | Pastizal (P) | | | Vegetación secundaria (VS) | | |
|-----------------|--------------------------|----------------------|--|-----------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| | Si/ o | No. Migrante s | Lugar | Si/ no | No. Migrante s | Lugar | Si/ o | No. Migrante s | Lugar |
| 1 | No | 0 | | Si | 2 | Mérida, Yucatán | Si | 1 | Cozumel , Quintana Roo |
| 2 | Si | 1 | Los Ángeles California | No | 0 | | No | 0 | |
| 3 | Si | 2 | Emiliano Zapata, Tabasco | Si | 2 | Villahermosa , Tabasco | No | 0 | |
| 4 | Si | 3 | Ejido Arenal, Balancán, Tabasco | Si | 2 | Mérida, Yucatán | Si | 1 | Estados Unidos |

| | | | |
|-------|---|---|---|
| Total | 6 | 6 | 2 |
|-------|---|---|---|

Cuadro 2.3. Apoyo de programas gubernamentales por uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entre- vista | Cultivo temporal (CT) | | Pastizal (P) | | Vegetación secundaria (VS) | |
|-----------------|--------------------------|----------|-----------------|----------|----------------------------|----------|
| | Si/no | Programa | Si/no | Programa | Si/no | Programa |
| | 1 | Si | SV | Si | Pensión, SV, y 60 y mas | No |
| 2 | Si | SV | No | | Si | SV |
| 3 | Si | SV | Si | PC | No | |
| 4 | No | | No | | No | |
| Total | | 3 | | 2 | | 1 |

SV= Sembrando vida; Procampo= PC

Cuadro 2.4. Empleos generados por uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entre- vista | Cultivo temporal (CT) | | | Pastizal (P) | | Vegetación secundaria (VS) | | |
|-----------------|--------------------------|-------------------|----|-----------------|----------------|----------------------------|-------------------|----|
| | Si/no | No. De empleos | De | Si/no | No. De empleos | Si/no | No. De empleos | De |
| | 1 | Si | 13 | Si | 2 | No | 0 | |
| 2 | Si | 2 | Si | 3 | Si | 2 | | |
| 3 | Si | 4 | Si | 4 | Si | 3 | | |
| 4 | No | 0 | Si | 6 | Si | 1 | | |
| Total | | 19 | | 15 | | 6 | | |

Cuadro 2.5. Acciones para la recuperación de los productores ante eventos hidrometeorológicos por uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Cultivo temporal (CT) | Pastizal (P) | Vegetación secundaria (VS) |
|------------|--|--|--|
| 1 | Utiliza agua de pozo en sequía, y el maíz lo ensila para el ganado | | Lo deja de utilizar en la seca porque no tiene agua |
| 2 | Espera el temporal (lluvia) para siembra, y tumba lo dañado por la sequía, siembra por etapas dejando descansar cuadrantes | En la sequias fuertes el municipio les brinda 3000 litros de agua diarios y alimento para el ganado, pacas de humidícola | Tiene un jaguey que desazolvaron para que no se seicara en la sequía, pero el zacate se seca |
| 3 | Cuando el maíz no se desarrolla se ocupa para alimento del ganado | El terreno no tiene agua, en tiempo de sequía no lo utiliza | Esperan las lluvias temporales para cultivar |
| 4 | Se inunda el maíz y se agarra para alimento de ganado | Se hace alimento para el ganado y se guarda para el tiempo de estiaje, para eso cultiva el zacate de corte | Deja recuperar el acahual |
| Total | 6 | 4 | 3 |

Cuadro 2.6. Superficie de los productores por uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Cultivo temporal (CT) | | Pastizal (P) | | Vegetación secundaria (VS) | |
|------------|-----------------------|--------|--------------|--------|----------------------------|--------|
| | Total | En uso | Total | En uso | Total | En uso |
| | | | | ha | | |

| | | | | | | |
|----------|----|------|------|-------|------|------|
| 1 | 26 | 6 | 60 | 40 | 16 | 16 |
| 2 | 17 | 2.5 | 43 | 34.5 | 30 | 10 |
| 3 | 10 | 7.5 | 40 | 40 | 43 | 8.5 |
| 4 | 7 | 3 | 15 | 15 | 22 | 6 |
| Total | 60 | 19 | 158 | 129.5 | 111 | 40.5 |
| Promedio | 15 | 4.75 | 39.5 | 32.3 | 27.7 | 10 |

Cuadro 2.7. Satisfacción de las necesidades básicas por uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Cultivo temporal (CT) | | Pastizal (P) | | Vegetación secundaria (VS) | |
|------------|-----------------------|---|--------------|-------------------------|----------------------------|--|
| | Si/no | Actividades indicadoras | Si/no | Actividades indicadoras | Si/no | Actividades indicadoras |
| 1 | Si | | Si | | Si | Saca postes para su cerca |
| 2 | Si | Juega con el tiempo para la siembra de cultivos | Si | | Si | Saca postes y plantas medicinales |
| 3 | Si | Guarda su cosecha | Si | | No | Saca leña |
| 4 | Si | Lo que produce es para ganado | Si | | Si | Saca estacas para su cerca, medicinales y madera en pocas ocasiones madera |

Cuadro 2.8.1. Productividad de cultivos de temporal en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Cultivo temporal (CT) |
|------------|-----------------------|
|------------|-----------------------|

| | Rendimiento en toneladas por hectárea (t/ha) | | | | | Cálculos de las toneladas por hectáreas en uso | | | | |
|----------|--|--------|----------|-------|--------|--|--------|----------|-------|--------|
| | Maíz | Frijol | Calabaza | Chile | Sandía | Maíz | Frijol | Calabaza | Chile | Sandía |
| 1 | 2 | | | 10 | 35 | 12 | | | 20 | 70 |
| 2 | 1 | | | | | 2.5 | | | | |
| 3 | 2 | 0.8 | 5 | | 8 | 15 | 1.6 | 10 | | 16 |
| 4 | 4 | | | | | 12 | | | | |
| Total | 9 | 0.8 | 5 | | 8 | 41.5 | | | | 86 |
| Promedio | 2.2 | | | | | 10.3 | | | | 43 |

Cuadro 2.8.2. Productividad del pastizal en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Cabezas de ganado/ha | Superficie utilizada | Cabezas de ganado/superficie utilizada |
|------------|----------------------|----------------------|--|
| 1 | 4 | 40 | 160 |
| 2 | 5 | 34.5 | 173 |
| 3 | 4 | 40 | 160 |
| 4 | 8 | 15 | 120 |
| Promedio | 5.2 | 32.3 | 153 |

Cuadro 2.8.3. Productividad de la vegetación secundaria según los

| Entrevistas | Vegetación secundaria (VS) | |
|-------------|------------------------------------|---------------------|
| | Producto | Total, de productos |
| 1 | Estacas | 30 |
| 2 | Ramoneo de ganado 8 cabezas /ha | 80 |
| 3 | Leña/brazados | 4 |
| 4 | Estacas | 30 |

2.9.1. Ingreso de producción de los cultivos temporales en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Cultivo temporal (CT) | | | | | | | | | |
|------------|--|--------|----------|-------|--------|---|--------|----------|--------|--------|
| | Ingresos en pesos por kilogramos (\$/kg) | | | | | Ingresos en pesos por el total de kilogramos producidos (\$/kg) | | | | |
| | Maíz | Frijol | Calabaza | Chile | Sandía | Maíz | Frijol | Calabaza | Chile | Sandía |
| 1 | 5 | | | 40 | 2.7 | 60000 | | | 800000 | 189000 |
| 2 | 7 | | | | | 17500 | | | | |
| 3 | 5 | 10 | 1.5 | | 1.5 | 75000 | 160000 | 15000 | | 24000 |

Cuadro 2.9.2.1 Ingreso de la producción por cabeza de ganado basado en revisión de literatura en pastizales de la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Clasificación del ganado | Peso (kg) | Precio/kg | Precio por animal (\$) |
|--------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| | | B | C= A*B |
| Toro | 750* | 30 | 22500 |
| Vaca | 450* | 25.7 | 11565 |
| Novillona | 350* | 37.8 | 13230 |
| Becerro | 185* | 43.8 | 8103 |
| Promedio | 446.25 | | 13850 |

*Peso del ganado Retes-López et al. (2019) y Castro-Sumano et al. (2019).

Cuadro 2.9.2.2 Ingreso total según los datos de los productores de la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Superficie utilizada (ha) | Cabezas de ganado/ha | Cabezas de ganado por superficie utilizada (ha) | de Ingreso por ganadero (\$) |
|------------|---------------------------|----------------------|---|------------------------------|
| | A | B | C= B*A | D = C*PPA* |
| 1 | 40 | 4 | 160 | 2216000 |
| 2 | 34.5 | 5 | 173 | 2396050 |
| 3 | 40 | 4 | 160 | 2216000 |
| 4 | 15 | 8 | 120 | 1662000 |

* Precio promedio por animal (PPA) = \$13850

Cuadro 2.9.2.3 Ingreso total por venta de becerros basado en revisión de literatura en pastizales de la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Superficie utilizada (SU) (ha) | UA ¹ (CG)/ha | UA SUxUA | Producción de becerros/año ² | Ingreso por venta de becerros ³ (\$/año) | Ingreso mensual (\$) |
|------------|--------------------------------|-------------------------|---------------|---|---|----------------------|
| | A | B | C= B*A | | | |
| 1 | 40 | 0.7 | 28 | 15 | 120000 | 10000 |
| 2 | 34.5 | 0.7 | 24 | 13 | 104000 | 8666 |
| 3 | 40 | 0.7 | 28 | 15 | 120000 | 10000 |
| 4 | 15 | 0.7 | 11 | 6 | 48000 | 4000 |

¹UA Unidad animal= 0.7/ha/año (Manjarrez-Muñoz et al., 2018¹); ²Producción de becerros/año= hato de 20 UA = 11 becerros/año (Granados-Rivera et al., 2018) ingreso por venta de un becerro = \$8000 (Celorio-Cacep et al., 2021).

Cuadro 2.9.3. Ingreso basado en la producción de la vegetación secundaria de la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Cuadro | Entrevistas | Producto | Precio del producto | Ingreso total | 2.10. |
|--------|-------------|---------------|---------------------|---------------|-------|
| | | | | \$ | |
| | 1 | Estacas | 60/estaca | 1800 | |
| | 2 | 8 UA/ha | 13,850/UA | 110800 | |
| | 3 | Leña/brazados | Autoconsumo | Autoconsumo | |
| | 4 | Estacas | 60/estaca | 1800 | |

UA=Unidad animal

Utilización de la producción por uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Cultivo temporal (CT) | | Pastizal (P) | | Vegetación Secundaria (VS) | |
|------------|--|----------|--------------|-------|-------------------------------|-------|
| | Autoconsumo | Venta | Autoconsumo | Venta | Autoconsumo | Venta |
| 1 | 1 t de maíz | | | X | X | X |
| 2 | X | El resto | | X | X | |
| 3 | Guarda 1 t de maíz, 50 kg de frijol, 10 kg de calabaza para gallinas | | X | X | X | |
| 4 | X | | | X | X | |

Cuadro 2.11. Plantas por uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Cultivo temporal (CT) | | Pastizal (P) | Vegetación secundaria |
|------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|---|
| | | | | |
| Especies | | | | |
| 1 | Caracolillo, cedro, naranja | maculís, jabín, | Remolino, estrella, jacinto | Tinto, popiste, maculís, zacate de campo, remolino, cabezón |

| | | | |
|---|--|-------------------|--|
| 2 | Calabaza, guanábana, chicozapote, mamey, achiote | naranja, aguacate | Estrella, grama de Tinto, popiste, maculís, zacate de campo, jabín, zamán |
| 3 | Caracolillo, calabaza, frijol | cedro, maculis | Humidícola, bombasa, Maculís, caracolillo, zacate natural, dormilona, guácimo, ceibo, jobo, palo malva, zarza, manguillo, mulato, tinto cuernenzuelo |
| 4 | Zacate brizanta | | Estrella, Taiwán verde y Cedro, tinto, melina, teca, morado y Alicia jobo, bolchiche, naranja, tucuy, guácimo, cedrillo, chicozapote, gusano |

Cuadro 2.12. Uso de plaguicidas por uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Cultivo temporal (CT) | | | | Pastizal (P) | | Vegetación secundaria (VS) | | | |
|------------|-----------------------|--------------------------|---|-------------------|--------------|--------------------------|----------------------------|-------|--------------------------|---------------------|
| | Si/no | Cantidad aplicada (L/ha) | Época de aplicación | Agroquímico usado | Si/no | Cantidad aplicada (L/ha) | Época de aplicación | Si/no | Cantidad aplicada (L/ha) | Época de aplicación |
| 1 | Si | 7 | Cada 15 días, edad temprana del cultivo (1 mes) | Cartucho (maíz) | No | | | No | | |
| 2 | Si | 0.8 | Al mes y medio, hasta que | Arrivo, cipermet | No | | | No | | |

| | | | | | | |
|---|----|-----|--|--|----|----|
| | | | acaba el rina, ciclo del foley cultivo | | | |
| 3 | Si | 2 | De 8 a 15 días después de cuatro a cinco semanas del cultivo | Arribo, Karate, cipermetrina, acaricidas | No | No |
| 4 | Si | .25 | Dos veces por ciclo | Para gusano cogollero | No | No |

Cuadro 2.13.- Uso de fertilizantes uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entr e- vista | Cultivo temporal (CT) | | | | y | Pastizal (P) | | | Vegetación secundaria (VS) | | |
|---------------------|--------------------------|-------------|------|------------------|---|-----------------|-------------|--------|-------------------------------|-------------|------|
| | Si/n o | CA kg/ha | A/CC | FA | | Si/n o | CA kg/ha | A/A | Si/no | CA kg/ha | A/CC |
| 1 | Si | 150 | 2 | 18-46-0 urea | | Si | 50 | 1 urea | No | | |
| 2 | Si | 100 | 3 | 17-17-17 fósforo | | No | | | No | | |
| 3 | Si | 100 | 2 | Urea y 20-30-10 | | No | | | No | | |
| 4 | Si | 100 | 1 | 10-46 y urea | | Si | | Urea | No | | |

CA= Cantidad aplicada; A/CC Aplicaciones por ciclo de cultivo; A/A= Aplicaciones al año; FA Fertilizante aplicado

Cuadro 2.14. Nombre que da el productor a la tierra por uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Cultivo temporal (CT) | Pastizal (P) | Vegetación Secundaria (VS) |
|-----------------|---|--|--|
| Clase de tierra | | | |
| 1 | Roja, se pone como una roca en tiempo de seca, se compacta bastante | Arcillo arenosa y para el bajo es un poco barroso, barroso con arena | Barrial |
| 2 | Barriosa, entre tierra negra y barro | Barrosa, es muy pegajosa | Barriosa chiclosa, negra café oscuro, zascab a 1 metro de profundidad |
| 3 | Arenosa con tierra roja | Arcillosa, se abre y se le va el machete, es muy pegajosa | Negra arenosa en el acahual |
| 4 | Tierra buena | negra | Barrosa, con grietas peligrosas, con conchas marinas, cerca está el zascab de conchitas, ha encontrado almejas grandes, donde el zascab está más hondo la tierra es más fértil |

Cuadro 2.15. Manejo del suelo uso agropecuario en la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Cultivo temporal (CT) | Pastizal (P) | Vegetación Secundaria (VS) |
|----------------|--------------------------|--------------|-------------------------------|
| Tipo de manejo | | | |

| | | | |
|---|---|--|---|
| 1 | Arado con rastra, se deja como pastizal y a los 4 años vuelve a cultivar | Barbecha y siembra pasto en las partes-donde | No |
| 2 | Abonos de lombriz con humitrón como raizal, se pasa rastra, se chapea y se siembra | Rotación de los predios, para dejar recuperar el pasto | Si, rotación del predio para el ganado, antes era pastizal, se acahualó, pero se está volviendo a limpiar para el ganado |
| 3 | Arado con rastra, año con año, todos los cultivos a su temporada, dejando los rastrojos de los cultivos | Ha mecanizado para sembrar pasto de nuevo y trabajar la tierra, a veces cultivos | Dejan que se acahuale, después lo roza, tumba y quema para milpa |
| 4 | Barbecho, rastreo, siembra, se usa tres años y se deja como pastizal con brizanta | Se prepara la tierra con rastreo para sembrar pasto de corte y se fertiliza cuando tiene uno a dos meses | Deja recuperar el acuahual, después de que fue caña, pasó a pastizal, ha sembrado maíz, y deja descansar la tierra, que se acahuale |

Cuadro 2.16. Calificación de la tierra por los productores por uso agropecuario en de la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Entrevista | Cultivo temporal (CT) | Pastizal (P) | Vegetación (VS) | Secundaria |
|------------|--|---|--|------------|
| 1 | Buena, pero pobre para cultivos de maíz, debido a la escasez de agua | Muy buena, porque lo que siembra ha dado buena producción, caña, sandía, calabaza | Regular, hay partes que están muy pobre y otras buenas | |
| 2 | Buena, porque de ahí produce y saca su cosecha para sobrevivir | Buena, mantiene el pasto en buen estado | Regular, el pasto se agota con facilidad y en otro predio no | |

| | | | |
|---|--|--|---|
| 3 | Regular, porque son tierras cansadas, según el tiempo produce | Regular, por el tipo de arcilla, tienen que ponerle fertilizantes para poder producir y que las lluvias lleguen en buen tiempo | Buena, porque casi todo lo que siembra se da, está fértil |
| 4 | Muy buena, pero los insumos subieron al doble y cuesta caro producir | Buena, porque el pasto se produce bien | Muy buena porque no utilizan fertilizantes |

Cuadro 2.17. Propiedades químicas y física de los usos de suelo de la región de Los Ríos, Tabasco, México.

| Usos de suelo | Materia orgánica (%) | Nitrógeno (%) | Densidad aparente (g cm ³) |
|---------------|----------------------|---------------|--|
| CT1 | 0.67 | 0.10 | 1.45 |
| CT2 | 4.09 | 0.34 | 0.90 |
| CT3 | 1.34 | 0.44 | 1.60 |
| CT4 | 0.74 | 0.14 | 1.53 |
| P1 | 4.09 | 0.31 | 1.25 |
| P2 | 8.04 | 0.44 | 0.94 |
| P3 | 4.29 | 0.31 | 1.00 |
| P4 | 4.69 | 0.17 | 1.29 |
| VS1 | 4.02 | 0.31 | 1.18 |
| VS2 | 6.70 | 0.34 | 0.89 |
| VS3 | 4.96 | 0.31 | 0.93 |
| VS4 | 6.70 | 0.34 | 1.16 |

Nota: Cultivo temporal (CT), Pastizal (P), Vegetación Secundaria (VS) Fuente:
Ramírez-García et al. (2022).