

Análisis de post-clasificación vectorial del avance de la frontera agrícola en el norte de Sinaloa 2005-2021

Vector post-classification analysis of the advance of the agricultural frontier in northern Sinaloa 2005-2021

Samuel **Moreno Meza**¹

Resumen

El objetivo de esta investigación es analizar la dinámica espacial del avance de la frontera agrícola en la región norte de Sinaloa durante el periodo 2005-2021. La expansión de la frontera agrícola representa uno de los procesos de transformación territorial más críticos para la conservación de la biodiversidad en el noroeste de México. Dada la posición de Sinaloa como el principal estado productor de alimentos en el país, resulta imperativo analizar cómo la expansión de su frontera agrícola compromete la integridad de los entornos naturales ante la constante presión por incrementar los rendimientos económicos. Bajo esta premisa, se emplea un análisis de post-clasificación vectorial en el entorno estadístico R sobre cartografía de uso del suelo y vegetación del INEGI; así mismo, se generó una matriz de transición para cuantificar la dinámica y el origen de los cambios territoriales. Los resultados revelan una expansión neta de la frontera agrícola en 295.72 km², impulsada por persistencia del 96%. La expansión se ejerció principalmente a expensas de

ecosistemas naturales, siendo las áreas de mezquital el ecosistema más vulnerable, perdiendo un 43.94% de su superficie total de 2005, lo que se traduce en conversión directa a cultivo. Se concluye que el crecimiento económico agrícola en el norte de Sinaloa está desvinculado de los criterios de sustentabilidad, exigiendo la implementación urgente de políticas de protección específica de los ecosistemas de transición.

Palabras clave: frontera agrícola, transición de uso de suelo, ecosistemas

Abstract

The objective of this research is to analyze the spatial dynamics of the agricultural frontier's advancement in the northern region of Sinaloa during the 2005-2021 period. The expansion of the agricultural frontier represents one of the most critical territorial transformation processes for biodiversity conservation in northwestern Mexico. Given Sinaloa's position as the country's leading food-producing state, it is imperative to analyze how the expansion of its agricultural frontier compromises the integrity of natural environments in the face of constant pressure to increase economic yields. Under this premise, a

¹Universidad Autónoma de Sinaloa

Recibido: 1 de diciembre de 2025

Aceptado: 10 de febrero de 2026

Publicado como **ARTÍCULO CIENTÍFICO** en *Ra Ximhai* 3(1): 271-293

doi.org/10.35197/rx.22.01.2026.12.sm

vector post-classification analysis was employed within the R statistical environment, utilizing INEGI land use and vegetation mapping; additionally, a transition matrix was generated to quantify the dynamics and origin of territorial changes. The results reveal a net expansion of the agricultural frontier by 295.72 km², driven by a persistence of 96%. This expansion occurred primarily at the expense of natural ecosystems, with mesquite forests (mezquital) being

the most vulnerable ecosystem, losing 43.94% of its total 2005 surface area due to direct conversion to cropland. It is concluded that agricultural economic growth in northern Sinaloa is decoupled from sustainability criteria, demanding the urgent implementation of specific protection policies for transition ecosystems.

Keywords: agricultural frontier, land use transition, ecosystems

INTRODUCCIÓN

El estado de Sinaloa en México es reconocido históricamente por su vocación agrícola (Cuadras Berrelleza et al., 2021). No obstante, este liderazgo ha generado una constante presión por incrementar la producción y la rentabilidad ha provocado un fenómeno significativo de avance de la frontera agrícola, ubicando a Sinaloa en el quinto lugar nacional con una participación del 5.6% (SIAP, 2024); esto impacta directamente en la dinámica territorial y en la composición de los ecosistemas naturales. El proceso de aumento de la frontera agrícola no solo implica la expansión de la superficie cultivada, sino también la modificación de los patrones de uso del suelo a expensas de la vegetación nativa.

El norte de Sinaloa es un área de particular interés debido a su infraestructura hídrica (Llanes Ocaña, 2023), lo que lo convierte en un motor de la actividad primaria, pero también en un punto focal de transformación ambiental. Comprender la magnitud y el origen de los cambios en el uso del suelo es crucial para evaluar las consecuencias socioeconómicas y ecológicas a largo plazo, y para fundamentar políticas de ordenamiento territorial sostenible (Cuadras Berrelleza et al., 2021).

El suelo es vital para la existencia biológica y el sostenimiento de los ecosistemas. Bautista (2004 en Torres y Rojas, 2018) lo considera un recurso no renovable por su prolongado proceso de formación, de ahí que sea primordial el monitoreo de la actividad agrícola. La actividad agrícola intensiva constituye uno de los pilares económicos fundamentales del estado de Sinaloa (Zuñiga Espinoza, 2024) debido a su elevada producción de granos básicos y hortalizas de exportación. Particularmente, la Región Norte de Sinaloa (RNS), que abarca el fértil Valle del Fuerte, es un polo

agroindustrial clave para la seguridad alimentaria nacional e internacional. Este dinamismo productivo, impulsado históricamente por grandes obras hidráulicas y la tecnificación del riego (Parra Cota, 2017), ejerce una presión constante sobre el territorio y sus ecosistemas naturales.

La expansión de la frontera agrícola es un fenómeno complejo y multifactorial que implica la transformación de áreas con cobertura vegetal natural en superficies dedicadas al cultivo (Torres Rojo et al., 2016). Este proceso no solo responde a las demandas del mercado y las políticas de fomento productivo, sino que también tiene profundas implicaciones socioeconómicas y, de manera crucial, ambientales, como la pérdida de biodiversidad, la degradación del suelo por presión antropogénica (Camacho Sanabria et al., 2015).

La incorporación de nuevas áreas a la producción agrícola es lo que se conoce como expansión de la frontera agrícola. Estas áreas sufren de una transición de uso de suelo que puede reducir un ecosistema como el bosque o el manglar o puede sustituir a otra actividad productiva como la acuicultura o la ganadería. La eliminación de los árboles nativos en ambientes silvestres provoca, de acuerdo con Abjorsen et al. (2004 como se citó en Torterolo, 2005), cambios significativos en las condiciones ambientales del sitio.

Trápaga Delfín (2013) reflexiona sobre lo imperativo de replantear la sostenibilidad del capitalismo como un sistema económico que necesita siempre crecer sin contemplación de lo finito. Es necesario contemplar la naturaleza del suelo como recurso irremplazable en términos de su función de proveedor de alimentos sin dejar de ver la compatibilidad de su productividad con la viabilidad del modelo agroindustrial.

El modelo agroindustrial en la región norte de Sinaloa, por no decir de todo México busca responder a demanda internacional más que a la seguridad alimentaria propia del país. Gran parte de la producción de hortalizas y frutas se destina a la exportación a Estados Unidos y Canadá. Incluso los países desarrollados adquieren tierras cultivables en países en vías de desarrollo para satisfacer su demanda doméstica (Cotula et al., 2009). Esta dinámica global ejerce una creciente presión sobre los ecosistemas locales donde se expande la frontera agrícola. Al respecto, Lipton y Sanghai (2017) argumentan que una distribución más equitativa de la tierra constituye una política pública clave para los países en desarrollo. En el caso de México, la reforma agraria representó un proceso histórico fundamental, aunque sus efectos fueron atenuados o revertidos por las

políticas neoliberales implementadas desde finales de la década de los noventa. A pesar de estas transformaciones, el Estado mantiene un rol determinante como ente regulador para gestionar el avance no controlado de la frontera agrícola.

Esta problemática se inserta en un contexto global donde la expansión de la frontera agrícola ha evolucionado de una simple búsqueda de superficie a un fenómeno de intensificación impulsado por innovaciones tecnológicas y presiones del mercado internacional (Foley et al., 2011; Winkler et al., 2021). Investigaciones recientes destacan que este avance no es lineal, sino que opera bajo dinámicas de teleacoplamiento, donde la demanda de alimentos en continentes como Asia o Europa dicta la transformación del suelo en regiones periféricas de América Latina (Hull y Liu, 2018).

Bajo esta lógica de mercado global, diversos países latinoamericanos han experimentado transformaciones críticas. En Argentina el crecimiento de la frontera agrícola en menos de cincuenta años ha visto desaparecer más del 66% de su superficie forestal autóctona (Zarrilli, 2008). Entre las causas de este fenómeno destaca el monocultivo de soja; este enfoque de producción intensiva, mantenido desde la década de los setenta, ha deteriorado los ámbitos ambiental, social y económico principalmente impactando a las regiones más vulnerables (Mercurio, 2021).

Por su parte, en Colombia, Garay Rey y Cárdenas Castro (2022) compararon la cobertura vegetal con la frontera agrícola en la subcuenca del río Teusacá. Encontraron transiciones en las variedades vegetales de la zona debido a cambios de uso del suelo. En otra región colombiana, a pesar de declaraciones de área protegida, Anzoategui et al. (2023) documentaron cambios en la distribución de la vegetación del Páramo Cortadera en el municipio de Boyacá, Colombia impulsados por la expansión de la frontera agrícola. Proponen implementar un enfoque participativo que involucre a todos los actores para abordar efectivamente la conservación, restauración y preservación del páramo.

Otras regiones han sido estudiadas en lo que respecta al avance de la frontera agrícola como Indonesia (Sari et al., 2020), las regiones boreales (Meyfroidt, 2021), la región del Amazonas ecuatoriana y brasileña (Rindfuss et al., 2007; Santos et al., 2021; Sehn Korting et al., 2023). La limitación de tierras aptas para la conversión agrícola constituye, según Bozzoli de Wille (1977), un factor determinante en la disminución de los pequeños productores agrarios y el alza de la precariedad socioeconómica

en el ámbito tanto rural como de las ciudades. Ante el panorama mundial de presión sobre los recursos naturales, resulta esencial examinar la evolución del territorio en el norte de Sinaloa. Este estudio permite determinar con precisión el alcance de la expansión agrícola, facilitando el diseño de medidas de mitigación orientadas a contener el deterioro de la biodiversidad regional.

El objetivo central de esta investigación es analizar la dinámica del avance de la frontera agrícola en el norte de Sinaloa, México (2005-2021), mediante el procesamiento de datos geospaciales vectoriales y el cálculo de matrices de transición, para cuantificar los flujos de cambio entre las distintas categorías de uso de suelo y vegetación e identificar las áreas de mayor presión por expansión agrícola. El enfoque no solo cuantifica el crecimiento de la frontera productiva, sino que revela la tasa de retiro de los ecosistemas nativos, sirviendo como fundamento técnico para políticas de gestión ambiental.

El cuerpo del artículo se desarrolla en las siguientes secciones: En primer lugar, se describe el área de estudio y los ecosistemas relacionados a la región norte de Sinaloa. Posteriormente, se detallan la metodología y las fuentes de información utilizadas. La sección central presenta los resultados del análisis multitemporal, cuantificando la superficie exacta de la conversión de cobertura natural a uso agrícola. Finalmente, se discuten las implicaciones y las conclusiones de este avance, ofreciendo una perspectiva sobre los desafíos de sustentabilidad y gestión territorial en la región norte de Sinaloa.

Área de Estudio

La investigación se centró en la región norte de Sinaloa, que abarca una combinación de planicies costeras, valles fluviales (como el Valle del Fuerte) y estribaciones montañosas de la Sierra Madre Occidental. Políticamente se divide en tres municipios (Figura 1). El estudio analizó el periodo comprendido entre el año 2005 y el 2021, un lapso de 16 años de intensa actividad agropecuaria y transformaciones territoriales en la entidad.

Los ecosistemas que predominan en la región son la selva de tipo baja caducifolia. En México es un tipo de selva tropical con un endemismo elevado (Zamora Crescencio et al., 2024). Se puede observar una franja de selva baja caducifolia por la parte Pacífico Norte del país. El ecosistema de bosques se localiza principalmente en las estribaciones montañosas al este de la región norte de Sinaloa, en áreas con mayor restricción topográfica. Su

ubicación periférica y menos accesible les confiere una relativa protección inicial, aunque no excluye la presencia de focos de deforestación.

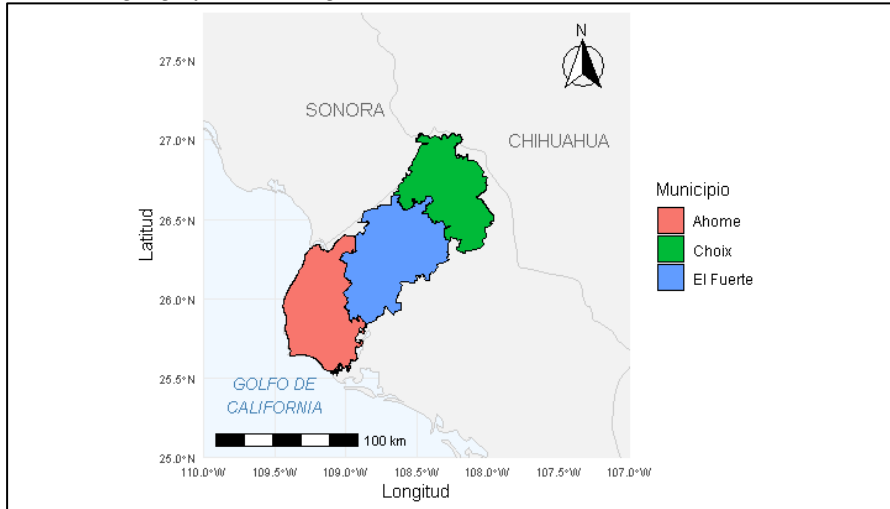
En la región se encuentra el bosque de galería que de acuerdo con Mendoza Cariño et al. (2023) se desarrollan a las orillas de los ríos. Otros tipos de bosques que se encuentran en la parte menos accesible de la región norte de Sinaloa son los bosques de encino, mezquite, pino y pino-encino. El mezquital no es un ecosistema estéril; es crucial para la fauna local, proporciona protección contra la erosión eólica e hídrica en las zonas semiáridas, y actúa como refugio biológico en el entorno agrícola. Su pérdida reduce la conectividad ecológica y los servicios ecosistémicos esenciales para la estabilidad regional. Aguirre Loredó (2024) menciona al mezquite como un recurso subutilizado ampliamente distribuido por las áreas áridas y semi áridas del noroeste mexicano.

El matorral constituye el ecosistema predominante en las vastas zonas áridas y semiáridas de México (González Gutiérrez et al., 2023). y ha sido la cobertura vegetal con mayor historial de aprovechamiento. Los tipos de matorral encontrados en la región norte de Sinaloa son el de tallos carnosos (sarco-crasicaule) y de tallos gruesos (sarcocaulle).

Los tipos de pastizales encontrados en la región son el cultivado permanente, pastizal inducido y el pastizal natural. Los pastizales se pueden encontrar en la cuarta parte de la superficie mexicana (Jurado Guerra et al, 2021). El uso de suelo para propósitos de acuicultura tiene un alcance menor al uno por ciento (Albornoz Mendoza et al, 2023). Solo tienen presencia en el municipio de Ahome y se encuentra a lado de otro ecosistema relevante como es el manglar que de acuerdo con Yáñez Arancibia et al. (1998) las acciones antrópicas lo mantienen en constante presión. La diversidad de ecosistemas descrita, caracterizada por la alta productividad agrícola, establece el marco geográfico adecuado de la investigación.

Métodos y técnicas de investigación

La base del análisis consistió en el procesamiento de datos geospaciales vectoriales (archivos *shapefile*) de la cartografía de uso del suelo y vegetación de las Series III (año base 2005) y VII (año base 2021), a escala 1:250,000, generadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) disponibles en el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad de la Comisión Nacional para el Conocimiento de la Biodiversidad (2025).

Figura 1*Ubicación geográfica de la región norte de Sinaloa*

Nota: Elaboración propia con datos de INEGI y el *Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*.

Con el objetivo de eliminar la variabilidad nominal entre las distintas series del INEGI, se ejecutó un proceso de normalización semántica mediante expresiones regulares (grepl). Este procedimiento permitió colapsar las categorías originales en 12 clases transversales, asegurando una comparación lógica entre 2005 y 2021. Con la finalidad de garantizar la compatibilidad metodológica entre ambas series y asegurar un esquema estandarizado para la detección de cambios en el territorio analizado.

El análisis fue desarrollado en el entorno estadístico R utilizando el paquete *sf* para la gestión y manipulación de datos geospaciales. Un paso crítico fue la aplicación de la función *st_make_valid*, la cual permitió corregir inconsistencias topológicas y geometrías inválidas en los polígonos originales, asegurando que el cálculo de superficies fuera exacto. Posteriormente, se realizó un recorte espacial mediante la función *st_intersection* utilizando como máscara la división política de los municipios de Ahome, El Fuerte y Choix.

La superficie resultante de cada solapamiento se sumó por par de clases (origen-destino) para construir la matriz de transición, cuantificando en km^2

y porcentualmente los flujos de cambio y permitiendo el cálculo de la persistencia y la vulnerabilidad relativa de cada uso de suelo. Este proceso de análisis vectorial garantizó la preservación de la precisión de los límites originales de las clases y la cuantificación exacta de los flujos de cambio. En la Tabla 1 se presenta el esquema de homologación de los usos de suelo y vegetación para el tratamiento de la información, eliminando así la variabilidad nominal y asegurando que las transiciones medidas representen cambios reales en el territorio.

Tabla 1

Esquema de homologación y correspondencia de categorías de uso de suelo y vegetación (Series III y VII de INEGI)

Clase Homologada	Clases originales con
Agricultura	Agricultura de riego anual
	Agricultura de riego anual y semipermanente
	Agricultura de riego plantación agrícola permanente
	Agricultura de temporal anual
Bosque	Bosque de encino
	Bosque de galería
	Bosque de mezquite
	Bosque de pino
	Bosque de pino-encino
Manglar	Manglar
Matorral	Matorral sarco-crasicaule
	Matorral sarco-crasicaule de neblina
	Matorral sarcocaule
Mezquital	Mezquital desértico

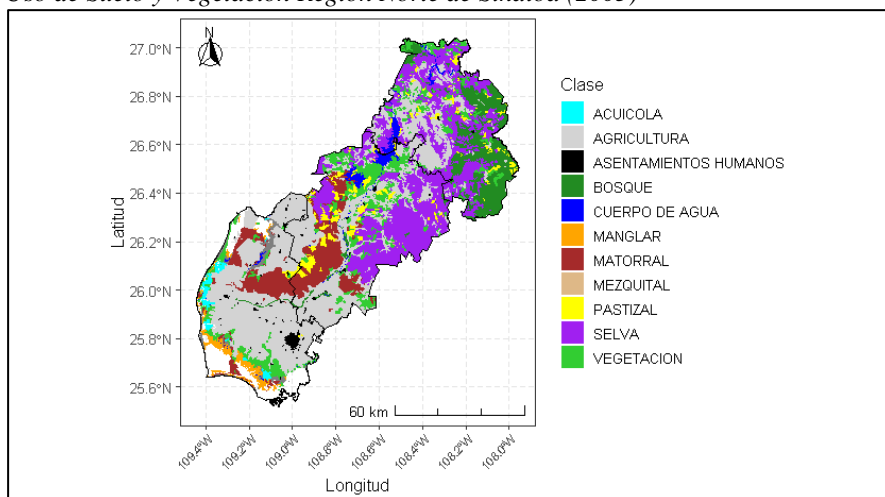
	Mezquital tropical
Pastizal	Pastizal cultivado permanente
	Pastizal inducido
	Pastizal natural
Selva	Selva baja caducifolia
Suelo desprovisto	Sin vegetación aparente
	Suelo desprovisto
Vegetación	Vegetación de dunas costeras
	Vegetación de galería
	Vegetación halófila xerófila
	Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia
	Vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa caducifolia
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino
	Vegetación secundaria arbustiva de matorral sarcocaula
	Vegetación secundaria arbustiva de matorral sarcocaula
	Vegetación secundaria arbustiva de mezquital desértico
	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia
	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa caducifolia

	Vegetación secundaria arbustiva de vegetación halófila xerófila
Asentamientos humanos	Zona urbana Asentamientos humanos
Acuícola	Acuícola
Cuerpo de agua	Cuerpo de agua

Nota: Elaboración propia a partir de la reclasificación de los atributos vectoriales de las Series III (2005) y VII (2021) del INEGI

Al inicio del período de estudio (2005) se puede apreciar (Figura 2) la dominancia de la actividad agrícola en las planicies aluviales y valles, concentrando la actividad económica y creando una matriz territorial homogénea. Los ecosistemas naturales como la Selva y el Bosque se localizaban en las estribaciones montañosas al este de la región, mientras que el mezquital y el matorral se ubicaban en el anillo de transición inmediato a la agricultura consolidada.

Figura 2
Uso de Suelo y Vegetación Región Norte de Sinaloa (2005)

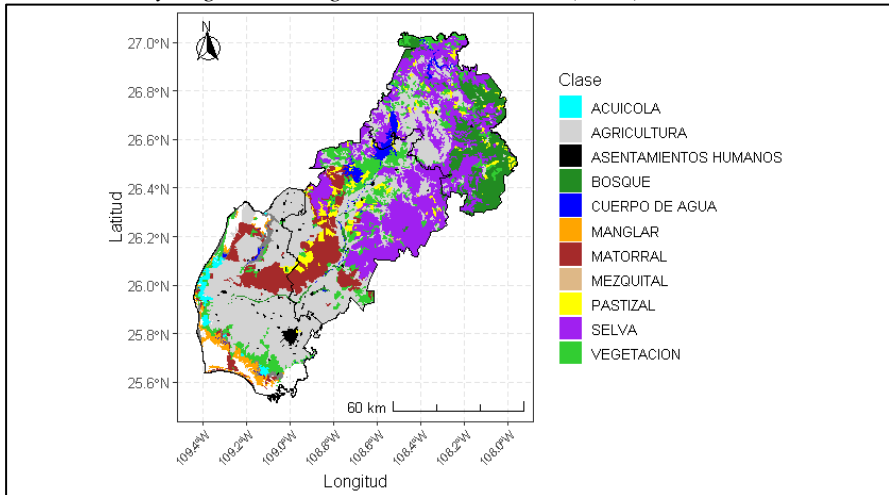


Nota: Elaboración propia mediante el procesamiento de datos vectoriales de la Serie III (2005) del INEGI en entorno R

Bajo la consolidación del modelo económico agroexportador en el norte de Sinaloa, la frontera agrícola registró un incremento para el año 2021. Este avance se focalizó en la periferia de las zonas agrícolas consolidadas, desplazando principalmente coberturas de mezquital y matorral. La figura 3 presenta la distribución espacial de las coberturas del territorio, reflejando una clara polarización entre las áreas productivas y los ecosistemas naturales remanentes. Se observa una mayor homogeneidad y una expansión perceptible de la frontera agrícola.

Figura 3

Uso de Suelo y Vegetación Región Norte de Sinaloa (2021)



Nota: Elaboración propia mediante el procesamiento de datos vectoriales de la Serie VII (2021) del INEGI en entorno R

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación del análisis multitemporal de cambio de uso de suelo y vegetación para la región norte de Sinaloa generó la cuantificación de los flujos de transformación y su distribución espacial. La agricultura es la clase de cobertura predominante, ocupando la planicie costera de la región y los valles. Esta área se caracteriza por una alta cohesión territorial, configurando una matriz continua. Las coberturas de vegetación de selva y bosque se concentran en la porción oriental de la región en las áreas de mayor altitud y pendiente, asociadas a las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, donde la selva ocupa la mayor extensión dentro de la zona montañosa. Por su parte, las zonas de matorral y mezquital presentan una estructura fragmentada, principalmente en los límites entre la zona agrícola y el área

montañosa Sierra de Barobampo, así como en parches dispersos dentro de la matriz de la agricultura.

Los resultados confirman que la expansión de la frontera agrícola constituyó el proceso dominante de transformación del paisaje en la región. Esta clase registró el mayor incremento absoluto con una ganancia neta de 295.7 km² (un +7.9% de su superficie territorial). Aunque fue la que más creció en km², en términos porcentuales su crecimiento es el más bajo de las clases de suelo con crecimiento. Esto se debe a que su superficie inicial en 2005 ya era preponderante, por lo que el crecimiento de 300 km² representa solo un pequeño aumento relativo a su tamaño total.

Del 2005 al 2021 la clase de suelo acuícola creció a la tasa más acelerada, aumentando un notable +55.10% (53.35 km²) de su superficie. La expansión de la acuicultura refleja el crecimiento de su infraestructura en la zona costera. Los asentamientos humanos muestran un crecimiento neto menor de +35.17% (35.12 km²), debido al desarrollo urbano asociado al crecimiento poblacional y económico de la región específicamente en la ciudad de Los Mochis, cabecera del municipio de Ahome. El pastizal mostró una expansión que puede indicar la conversión de otros tipos de vegetación o áreas degradadas a uso ganadero. Su expansión fue de 66.16 km² (+18.12%).

Las clases de suelo que tuvieron contracción territorial principalmente fueron los ecosistemas de vegetación (tabla 2). En términos absolutos las áreas de selva y matorral fueron los mayores proveedores de suelo a otras clases, con pérdidas que superan los 140 km² cada uno. No obstante, el mezquital se consolida como el ecosistema más vulnerable, al registrar una pérdida relativa del -43.94% de su superficie total de 2005. Los ecosistemas de vegetación semiárida de baja elevación fueron el objetivo prioritario del desmonte. La clase matorral muestra la segunda pérdida porcentual más significativa, con una contracción cercana al -25%. La pérdida de la selva, en términos relativos fue de 5.64% a pesar de su acceso topográfico limitado.

Tabla 2

Comparación de áreas de uso de suelo y vegetación en km² y variación neta (2005 vs. 2021)

Clase de suelo	Área km ²	Área km ²	Cambio	Cambio
----------------	----------------------	----------------------	--------	--------

	2005	2021	km ²	%
ACUICOLA	96.8	150.1	53.3	55.1
AGRICULTURA	3731.0	4026.7	295.7	7.9
ASENTAMIENTOS HUMANOS	99.8	134.9	35.1	35.1
BOSQUE	894.9	859.2	-35.6	-3.9
CUERPO DE AGUA	203.1	223.9	20.7	10.2
MANGLAR	179.5	190.8	11.3	6.3
MATORRAL	933.1	788.2	-144.9	-15.5
MEZQUITAL	11.0	6.1	-4.8	-43.9
PASTIZAL	365.0	431.1	66.1	18.1
SELVA	2573.0	2427.7	-145.2	-5.6
SUELO DESPROVISTO	150.0	NA	NA	NA
VEGETACION	1130.1	1134.28974	4.1	0.3

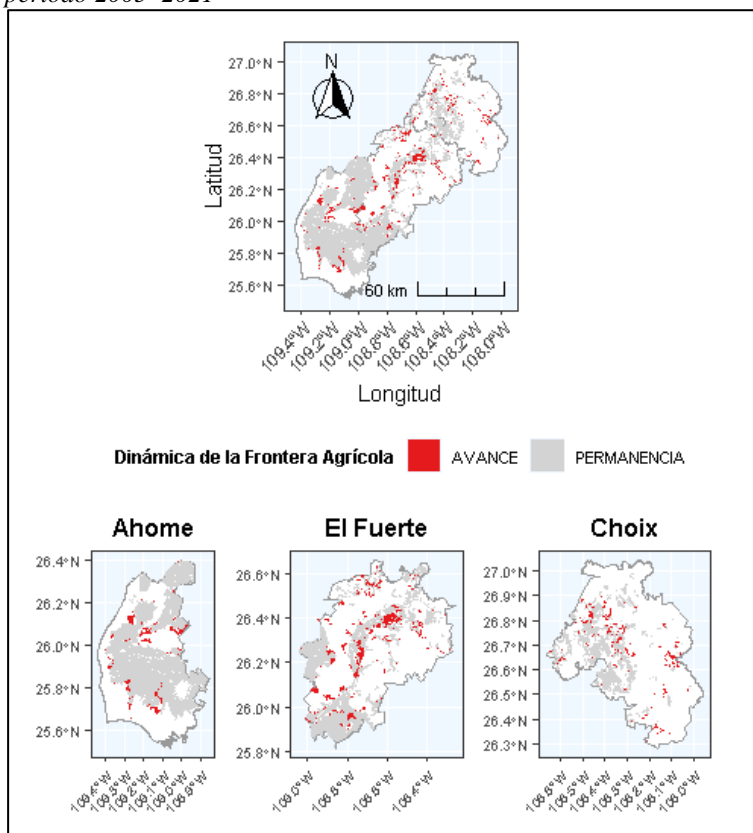
Nota: La superficie “SUELO DESPROVISTO” no fue documentada o fue reclasificada en la serie cartográfica de 2021 bajo otro criterio

La frontera agrícola en su crecimiento de casi 8 puntos porcentuales durante el periodo 2005-2021 se caracterizó por la absorción de más de 325km² de vegetación natural para alimentar la expansión de la agricultura y, en menor medida, el crecimiento de los sectores acuícola y de asentamientos humanos. La figura 4 se presenta como resultado visual de la investigación. Evidencian el avance de la frontera agrícola, cartografiando las transiciones hacia el uso de suelo agrícola en 2021. El color gris delimita la permanencia de la frontera agrícola preexistente, sirviendo como base de contraste para identificar nuevas áreas de uso agrícola. La cartografía de colores permite identificar las áreas donde la vegetación original fue desplazada. Este proceso muestra un patrón diferenciado: la agricultura gana terreno sobre el matorral y el mezquital en las zonas colindantes al riego, mientras que el avance sobre la selva baja se localiza preferentemente en zonas de mayor elevación y pendiente.

Los cambios se concentran en las zonas que rodean el núcleo agrícola consolidado, especialmente en la franja costera y las áreas de valle. Se observa una distribución significativa y dispersa de la expansión de la frontera agrícola sobre el mezquital (azul oscuro). Esto es particularmente notable en Ahome y El Fuerte, confirmando espacialmente que la conversión del mezquital fue un proceso generalizado.

Figura 4

Transiciones del suelo convertido a agricultura en la región norte de Sinaloa, periodo 2005–2021



Nota: Elaboración propia mediante el procesamiento de datos vectoriales de las Series III (2005) y VII (2021) del INEGI (Escala 1:250,000) bajo el entorno estadístico R. El color rojo identifica el frente de avance sobre coberturas naturales

Las transiciones Pastizal-Agricultura se encuentran intercaladas y adyacentes a las áreas de mezquital. Esto demuestra que la expansión

agrícola atacó tanto la vegetación de mezquital como las tierras usadas para pastoreo, confirmando el proceso de intensificación productiva en las zonas de transición. De igual manera la conversión del matorral a agricultura es visible en parches a lo largo del límite de la zona agrícola.

Aunque menores, se revela la localización de la conversión de ecosistemas más sensibles como es la selva y el bosque. Estas áreas aparecen como puntos aislados o pequeños parches en las estribaciones de la Sierra de Choix (zona este y noreste del mapa). Esta distribución puntual sugiere que el desmonte de estos ecosistemas de mayor valor biológico ocurrió en áreas específicas, probablemente facilitadas por accesos o proyectos particulares. El avance de la frontera agrícola fue un proceso centrado en la absorción de los remanentes de vegetación de transición.

Mediante la técnica de matriz de transición (Tabla 3) se cuantifica la relación cuantitativa de los flujos de cambio de uso de suelo en el período 2005 al 2021 en km² y en porcentaje. El avance de la frontera agrícola se define por la columna de agricultura (conversiones desde otros usos al uso agrícola). La vegetación aportó mayor valor absoluto con 177 km² (15.7%). La selva aportó 83.3 km²(3.2%) y el matorral 80.1 km²(8.6%) directamente al avance de la frontera agrícola. La selva demostró una alta susceptibilidad a la degradación. Solo el 3.2% se convirtió directamente en agricultura, pero el 1.5% cambió a vegetación y el 1.1% a pastizal. Esto indica que el proceso de degradación forestal para otros usos como la ganadería.

Tabla 3
Matriz de transición área en km²

Clase de Uso de Suelo y Vegetación en 2005	ACUICOLA	AGRICULTURA	ASENTAMIENTOS HUMANOS	BOSQUE	CUERPO DE AGUA	MANGLAR	MATORRAL	MEZQUITAL	PASTIZAL	SELVA	VEGETACION
ACUICOLA	9 4. 0	1.1	0.0	0	0.0	3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
AGRICULTURA	3. 3	358 2.3	27.2	0. 2	13.4	0. 4	0.9	0.0	15. 7	10.0	77. 5

ASENTAMIENTOS HUMANOS	0.0	0.7	99.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BOSQUE	0.0	33.5	0.7	85.2	0.4	0.0	0.0	4.4	0.2	2.8	
CUERPO DE AGUA	2.5	1.2	0.0	0.4	197.3	1.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4
MANGLAR	2.3	0.0	0.7	0.0	0.0	171.7	1.7	0.0	0.1	0.0	2.4
MATORRAL	1.3	80.1	0.7	0.7	0.6	2.7	776.5	0.0	61.2	0.4	8.7
MEZQUITAL	0.0	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	0.0	0.0	0.0
PASTIZAL	0.0	62.5	0.9	0.7	0.9	0.0	7.3	0.0	273.2	0.4	19.2
SELVA	0.0	83.3	0.0	2.7	4.1	0.0	0.9	0.0	28.3	241.5.6	38.2
SUELO DESPROVISTO	9.3	0.0	0.4	0.0	1.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	131.1
VEGETACION	3.7	177.0	4.9	1.7	5.7	3.2	0.6	0.0	48.3	1.1	850.2

Nota: Elaboración propia con datos de INEGI

La matriz normalizada (Tabla 4) revela las transiciones relativas de cambio de uso de suelo. El 44.0% de la superficie clasificada como mezquital en 2005 se convirtió en suelo agrícola para 2021. Este ecosistema fue el más afectado en términos relativos. El pastizal tuvo una transición a agricultura de 17.1% (62.5 km²), confirmando que casi una quinta parte de las tierras de pastoreo fueron intensificadas.

Los ecosistemas costeros como el manglar en la franja costera del municipio de Ahome por su ubicación geográfica específica y su protección legal más estricta determinan que la agricultura no pueda expandirse directamente sobre ellos, aunque sí son vulnerables a la alteración hidrológica y a la contaminación de escorrentía agrícola. La matriz demuestra que el avance de la frontera agrícola es un proceso complejo, impulsado por la conversión directa a cultivos y por la absorción de áreas de transición. Es esencial para comprender la intensidad de la presión ejercida sobre cada tipo de uso de suelo, expresada como el porcentaje de su superficie de 2005 que cambió a otra categoría.

La frontera agrícola persiste con un 96.0%, demostrando una estabilidad estructural. El ecosistema de bosques presenta una persistencia del 95.3%, pero tiene una probabilidad de conversión del 3.7% a agricultura. El matorral, además de perder el 8.6% a agricultura, tiene una probabilidad del 6.6% de convertirse en pastizal. Esto indica que la degradación a través del sobrepastoreo o manejo inadecuado es un factor significativo en la pérdida de suelo de matorral. La matriz normalizada subraya que el mezquitil, con una probabilidad de conversión del 44.0%, es el indicador de deforestación más sensible en la región, mientras que la expansión agrícola es el motor de cambio más potente, afectando de manera diferenciada a todos los ecosistemas de vegetación natural.

Tabla 4
Matriz de transición normalizada

Clase de Uso de Suelo y Vegetación en 2005	ACUICOLA	AGRICULTURA	ASENTAMIENTOS URBANOS	BOSQUE	CUERPO DE AGUA	MANGLAR	MATORRAL	MEZQUITAL	PASTIZAL	SELVA	VEGETACION
ACUICOLA	97.4	1.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
AGRICULTURA	0.1	96.0	0.7	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	2.1

ASENTAMIENTOS HUMANOS	0.0	0.7	99.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BOSQUE	0.0	3.7	0.1	95.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.3
CUERPO DE AGUA	1.2	0.6	0.0	0.2	97.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
MANGLAR	1.3	0.0	0.4	0.0	0.0	96.0	0.9	0.0	0.0	0.0	1.3
MATORRAL	0.1	8.6	0.1	0.1	0.1	0.3	83.2	0.0	6.6	0.0	0.9
MEZQUITAL	0.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	55.8	0.0	0.1	0.0
PASTIZAL	0.0	17.1	0.2	0.2	0.2	0.0	2.0	0.0	74.8	0.1	5.3
SELVA	0.0	3.2	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	1.1	93.9	1.5
SUELO DESPROVISTO	6.2	0.0	0.2	0.0	0.8	4.7	0.1	0.0	0.0	0.0	88.0
VEGETACION	3.3	15.7	0.4	0.2	0.5	0.3	0.1	0.0	4.3	0.1	75.2

Nota: Elaboración propia con datos de INEGI

Los resultados cuantitativos demuestran que, durante el periodo 2005 a 2021 la región experimentó un avance de la frontera agrícola neta de 295.72 km². El patrón espacial del avance de la frontera agrícola en la región norte de Sinaloa muestra implicaciones palpables de pérdida de capital natural que afectan la resiliencia y sustentabilidad de la región.

CONCLUSIONES

El análisis del cambio de uso de suelo y vegetación en la Región Norte de Sinaloa (2005-2021) permite concluir que la expansión de la frontera agrícola es el proceso dominante en la dinámica territorial, donde el costo ecológico ha sido asumido de forma desproporcionada por los ecosistemas

de transición. Se confirma la consolidación irreversible del modelo agroindustrial, el cual registró un incremento neto de 295.72 km² de frontera agrícola. El hallazgo más crítico es la drástica conversión del mezquital, cuya cobertura original se redujo en un 43.9%, quedando apenas 6.1 km² de superficie remanente al año 2021. Esta pérdida, junto con el desplazamiento de pastizales (17.1%) y otras coberturas de vegetación (15.7%), consolida al mezquital como el ecosistema más vulnerable de la región y sensible ante la presión del mercado agroexportador.

En términos espaciales, los resultados revelan que la expansión no es aleatoria, sino que obedece a la proximidad geográfica. Las áreas de matorral, mezquital y pastizal representan la frontera inmediata de conversión. Esta absorción sistemática de tierras, particularmente en municipios como Ahome, refleja un patrón de intensificación donde los criterios de conservación ambiental han sido omitidos en favor del fomento productivo y la demanda del mercado.

Se concluye que la expansión de la frontera agrícola incrementa la vulnerabilidad regional. Este fenómeno ejerce una presión adicional sobre los recursos hídricos del sistema de presas del norte de Sinaloa, factor de riesgo crítico ante la variabilidad climática actual.

Es urgente la implementación de un sistema de monitoreo continuo que permita a las autoridades detectar y mitigar focos de deforestación en tiempo real. Se debe priorizar la emisión de regulaciones que restrinjan estrictamente el cambio de uso de suelo en los últimos remanentes de mezquital y matorral. La viabilidad ecológica y productiva del norte de Sinaloa a largo plazo depende de la capacidad de conciliar el liderazgo agrícola del estado con la protección de los servicios ecosistémicos que sostienen la vida en la región.

LITERATURA CITADA

- Aguirre Loredó, R. Y. (2025). Mesquite Tree (*Prosopis* spp.): A Native Resource for the Potential for Human Consumption and Healthcare. *Plant Foods for Human Nutrition*, 80(5) <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01255-x>
- Albornoz Mendoza, L., Mercado García, A., & Mendoza Tinoco, D. (2023). Uso de suelo del sector primario desde la perspectiva del consumo en México (2018). Un enfoque multisectorial de insumo-producto. *El trimestre económico*, 90(359), 703-730. <https://doi.org/10.20430/ete.v90i359.1769>

- Anzoategui, L. V., Gil Leguizamón, P. A., & Sanabria Marin, R. (2023). Frontera agrícola y multitemporalidad de cobertura vegetal en Páramo del Parque Regional Natural Cortadera (Boyacá, Colombia). *Bosque (Valdivia)*, 44(1), 159-170. <https://dx.doi.org/10.4067/s0717-92002023000100159>
- Bozzoli de Wille, M. E. (1977). La frontera agrícola de Costa Rica y su relación con el problema agrario en zonas indígenas. *Anuario de estudios centroamericanos*, No. 3, 225-234. <https://www.jstor.org/stable/25661616>
- Camacho Sanabria, J. M., Juan Pérez, J. I., Pineda Jaimés, N. B., Cadena Vargas, E. G., Bravo Peña, L. C., & Sánchez-López, M. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y bosques*, 21(1), 93-112. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000100008&lng=es&tlng=es.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2025). *Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad - CONABIO*. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Cotula, L., Vermeulen, S., Leonard, R. y Keeley, J., (2009). *Land grab or development opportunity?: agricultural investment and international land deals in Africa*. IIED/FAO/IFAD, Londres. <https://www.iied.org/sites/default/files/pdfs/migrate/12561IIED.pdf?2009>
- Cuadras Berrelleza, A. A., Peinado Guevara, V. M., Peinado Guevara, H. J., López López, J. de J., & Herrera Barrientos, J. (2021). Agricultura intensiva y calidad de suelos: retos para el desarrollo sustentable en Sinaloa. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(8), 1401-1414. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2704>
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., . . . Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Garay Rey, K., y Cárdenas Castro, E. (2022). Análisis comparativo de la cobertura vegetal (2015) con la frontera agrícola (2018) en la subcuenca del río Teusacá. *CITAS, Suplemento(1)*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9085631>

- González Gutiérrez, I., Farfán Gutiérrez, M., Morales Manilla, L. M., Pérez Salicrup, D. R., Garza Saldaña, J. J., & Medina Puente, A. (2023). Índices y modelos para la predicción de la ocurrencia de incendios forestales: una revisión para México. *Revista Geográfica de América Central*, (71), 193-220. <https://dx.doi.org/10.15359/rgac.71-2.7>
- Hull, V., & Liu, J. (2018). Telecoupling: A new frontier for global sustainability. *Ecology & Society*, 23(4). <https://doi.org/10.5751/ES-10494-230441>
- Jurado Guerra, P., Velázquez Martínez, M., Sánchez Gutiérrez, R. A., Álvarez Holguín, A., Domínguez Martínez, P. A., Gutiérrez Luna, R., Garza Cedillo, R. D., Luna Luna, M., & Chávez Ruiz, M. G. (2021). Los pastizales y matorrales de zonas áridas y semiáridas de México: Estatus actual, retos y perspectivas. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 12(Supl. 3), 261-285. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5875>
- Lipton, M., & Sanghai, Y. (2017). Food security, farmland access ethics, and land reform. *Global Food Security*, 12, 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.03.004>
- Llanes Ocaña, J. G. (2023) Calidad y uso potencial de la red hidrográfica del centro-norte de Sinaloa, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 14(2) 337-375. <https://doi: 10.24850/j-tyca-14-02-09>
- Mendoza Cariño, M., Cruz Flores, G., & Mendoza Cariño, D. (2023). Salud de los bosques de galería y de los ecosistemas ribereños. *Madera y bosques*, 29(1), e2912387. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912387>
- Mercurio, N. (2021). La república sojera: orígenes y consecuencias de la agroexportación de la soja en Argentina. *Estudios Rurales*, 11(24). Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/3851>
- Meyfroidt, P. (2021). Emerging agricultural expansion in northern regions: Insights from land-use research. *One Earth*, 4(12), 1661-1664. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.11.019>
- Parra Cota, F. I. (2017). Potencial agrobiotecnológico de bacterias aisladas de suelos agrícolas asociados al cultivo de maíz en el Valle del Fuerte, Sinaloa. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 13(2), 51-57. <https://revista.itson.edu.mx/index.php/rlnr/article/view/264>
- Rindfuss, R. R., Entwisle, B., Walsh, S. J., Mena, C. F., Erlien, C. M., & Gray, C. L. (2007). Frontier Land Use Change: Synthesis, Challenges, and Next Steps. *Annals Of The Association Of*

- American Geographers*, 97(4), 739-754.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.2007.00580.x>
- Santos, R. S., Wiesmeier, M., Cherubin, M. R., Oliveira, D. M., Locatelli, J. L., Holzschuh, M., & Cerri, C. E. (2021). Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. *Geoderma*, 400, 115149.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115149>
- Sari, D. W., Hidayat, F. N., & Abdul, I. (2020). Efficiency of land use in smallholder palm oil plantations in Indonesia: A stochastic frontier approach. *Forest and Society*, 5(1), 75-89.
<https://doi.org/10.24259/fs.v5i1.10912>
- Sehn Korting, M., Lima, D. A., Sobreiro Filho, J. (2023). Brazilian Agricultural Frontier: Land Grabbing, Land Policy, and Conflicts. *IDS Bulletin* 54(1), 73-88.
<https://hdl.handle.net/20.500.12413/17853>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Panorama Agroalimentario 2024: Región Noroeste*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/942941/Panorama_FA_2024_Regi_n_Noroeste.pdf
- Torres, F., & Rojas, A. (2018). Suelo agrícola en México: retrospección y prospectiva para la seguridad alimentaria. *Realidad, datos y espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 9(3), 137-155. https://www.researchgate.net/profile/Agustin-Rojas-Martinez/publication/344279640_Suelo_agricola_en_Mexico_Retrospeccion_y_Prospectiva_para_la_Seguridad_Alimentaria/links/5f62fa97299bf1d43c0acfd/Suelo-agricola-en-Mexico-Retrospeccion-y-Prospectiva-para-la-Seguridad-Alimentaria.pdf
- Torres Rojo, J., Magaña Torres, O., & Moreno Sánchez, F. (2016). Prediction of land use change/forest cover in Mexico Trough transition probabilities. *Agrociencia*, 50(6), 769-785.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952016000600769&lng=es&tlng=en.
- Tortero, M. K. (2005). La expansión de la frontera agrícola, un acercamiento desde el punto de vista climático. *Apuntes Agroeconómicos*, 4(3).
http://ri.agro.uba.ar/files/download/revista/apuntes/AA2005tortero_mariakarina.pdf
- Trápaga Delfín, Y. (2012). El fin de la frontera agrícola y el acaparamiento de tierras en el mundo. *Investigación económica*, 71(279), 71-92. Recuperado en 30 de noviembre de 2025, de

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-16672012000100004&lng=es&tlng=es.

- Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M. *et al.* Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nat Commun* 12, 2501 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>
- Yáñez Arancibia, A., Twilley, R. R., & Lara-Domínguez, A. L. (1998). Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global. *Madera y bosques*, 4(2), 3-19. <https://doi.org/10.21829/myb.1998.421356>
- Zamora Crescencio, P., Aragón Gastélum, J. L., Contreras, J., Barrientos Medina, R. C., Aguirre Crespo, F. J., Gutiérrez Báez, C., & Plasencia Vázquez, A. H. (2024). Diversidad, composición y estructura de especies leñosas de la selva baja caducifolia en Lerma, Campeche. *Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios*, 11(2). <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.3819>
- Zarrilli, A. (2008). Bosques y agricultura: una mirada a los límites históricos de sustentabilidad de los bosques argentinos en un contexto de la explotación capitalista en el siglo XX. *Luna Azul*, (26), 87-106. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742008000100006&lng=en.
- Zúñiga Espinoza, N. G. (2024). Precios de garantía e impuesto predial rústico en mercado del maíz blanco. *Investigación administrativa*, 53(133). <https://doi.org/10.35426/iav53n133.11>

SÍNTESIS CURRICULAR

Samuel Moreno Meza

Estudiante de Doctorado en Economía y Negocios Internacionales en la Universidad Autónoma Indígena de México. Maestro en Administración/UdeO (2017), Lic. en Mercadotecnia/ UdeO (2004). Profesor Asignatura Base de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Correo electrónico: samuel.moreno@uas.edu.mx, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2672-0657>