



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

**EL IMPACTO DE LA EXPANSIÓN AGROPECUARIA Y DE LA ESTRUCTURA DEL
SISTEMA AGRÍCOLA SOBRE LA SEGURIDAD ALIMENTARIA EN MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
JOSÉ MAURICIO GALEANA PIZAÑA

TUTOR PRINCIPAL:
DR. STÉPHANE ROBERT ANDRÉ COUTURIER
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA (UNAM)

COMITÉ TUTOR:
DR. GERARDO BOCCO VERDINELLI
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL (CIGA)

DR. ALEJANDRO MONSIVAIS HUERTERO
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL (IPN)

CIUDAD DE MÉXICO. AGOSTO 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a dos Programas de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT):

PAPIIT 302417: "Seguridad alimentaria versus protección ambiental: diseño de una plataforma cartográfica nacional para el análisis multiescalar de su compatibilidad". Por el apoyo financiero para la realización de la tesis.

PAPIIT 300515: "Una caracterización territorial de la contribución de la sociedad mexicana al cambio ambiental global". Por el apoyo financiero para la realización de la tesis.

DEDICATORIA

INDICE

Resumen

Introducción

Objetivo General

Objetivos Particulares

Hipótesis

Capítulo 1. Marco Teórico

1.1 Sistemas Socioecológicos (SSE)

1.2 Sistema Alimentario como SSE

1.3 Cambio Global

1.4 Cambio de Uso del Suelo y Sistema Agroalimentario

1.5 Avances en la conceptualización de seguridad alimentaria

Capítulo 2. Marco de Referencia

2.1 Medición de la Seguridad Alimentaria: Índices Globales y Nacionales

2.2 Estructura del Sistema Agrícola y Seguridad Alimentaria

2.3 Sistemas de información geográfica para el análisis de SSE

2.4 Sistemas de información geográfica para el análisis de seguridad alimentaria

Capítulo 3. Métodos

3.1 Áreas de Estudio

3.2 Fuente de Datos

3.3 Métodos

3.3.1 Índice de Eficiencia Alimentaria y Ambiental

3.3.1.1 Marco Metodológico asociado al Análisis de Tendencia y Correlación

3.3.1.2 Indicadores de Seguridad Alimentaria

3.3.1.3 Análisis de Procesos de Cambio de Uso de Suelo

3.3.1.4 Análisis de Tendencias a partir del Método de Correlación de Spearman

3.3.1.5 Construcción de los índices de Eficiencia Alimentaria y Ambiental

3.3.2 Modelo de Ecuaciones Estructurales de la Seguridad Alimentaria Rural en México

3.3.2.1 Marco Metodológico asociado a los Modelos de Ecuaciones Estructurales

3.3.2.2 Unidad de Análisis: áreas de control

3.3.2.3 Variables Predictoras asociadas al Sistema Agrícola

3.3.2.4 Variables Predictoras asociadas a Seguridad Alimentaria

3.3.2.5 Contrucción del Modelo de Ecuaciones Estructurales

Capítulo 4. Índice de Eficiencia Alimentaria y Ambiental en México

Assessing food security and environmental protection in Mexico with a GISbased Food

Environmental Efficiency index

Capítulo 5. Enlace de la estructura de los sistemas agrícolas y la seguridad alimentaria rural en México

Linking the structure of the agricultural systems and rural food security in Mexico: an approach using Structural equation modeling

Capítulo 6. Conclusiones y Perspectivas

6.1 Conclusiones generales

6.2 Principales contribuciones

6.3 Replicabilidad de los análisis

6.4 Perspectivas

Referencias Generales

RESUMEN

Los sistemas agroalimentarios son sistemas socioecológicos que se sostienen sobre una amplia diversidad de ecosistemas, y son gestionados por una variedad de actores que complejizan su entendimiento y planeación. Las personas obtienen de los socio-ecosistemas agroalimentarios beneficios que usan como parte fundamental de sus ingresos y de su alimentación; a su vez, los ecosistemas sobre los cuales reposa la actividad agrícola se ven impactados por las decisiones y prácticas en torno a la producción. Teniendo en cuenta la complejidad socioecológica y la diversidad de sistemas agrícolas en México, se realizaron dos ejercicios: a) un análisis de tendencias espacio-temporales de las dinámicas entre aproximaciones de seguridad alimentaria y la expansión de sistemas agrícolas y pecuarios para la construcción de un índice de eficiencia alimentaria-ambiental y b) un modelo conceptual que ayudara en la identificación de las relaciones directas e indirectas entre los factores que integran la estructura del sistema agrícola, respecto a los componentes de seguridad alimentaria (disponibilidad, accesibilidad y utilización). Ambos análisis se construyeron a nivel de ecorregiones, con comparativa con las tendencias nacionales con el fin de contar con un panorama regional del país en función de los ecosistemas, recursos naturales y actividades humanas presentes.

El resultado del análisis de tendencias de seguridad alimentaria a nivel nacional reveló que existe un estancamiento del acceso a los alimentos en todo el país en el período de 1976 a 2011, que disminuye la autosuficiencia alimentaria respecto a los tipos de cultivos analizados (maíz, frijol, trigo y arroz) y el ganado con excepción del maíz y más recientemente la carne de bovino. A nivel de ecorregión se mantuvo la misma tendencia observada a nivel nacional: bajo acceso a los alimentos y autosuficiencia alimentaria negativa para la mayoría de los cultivos y el ganado dentro de cada ecorregión. No obstante, en el caso del maíz la idea de que la expansión de las tierras de cultivo en todo el país podría haber desencadenado una mejora generalizada en la autosuficiencia de este grano a nivel nacional, se diluyó cuando se observó que a nivel de ecorregión el 51% de la expansión acumulada de tierras de cultivo se produjo en la ecorregión Tropical Húmeda y en las Sierras Templadas, mismas que concentran la mayor cantidad de población mexicana y en donde la autosuficiencia del maíz no ha mejorado y sigue siendo negativa. Sin embargo, es importante reconocer que la autosuficiencia del maíz ha mejorado en las ecorregiones restantes, en donde la expansión de las tierras de cultivo fue mucho menor, y en conjunto con otros factores se impulsó la mejora de la autosuficiencia del maíz reflejada en el análisis a nivel nacional.

Respecto al análisis del índice de Eficiencia Alimentaria-Ambiental (FEE, por sus siglas en inglés) en el que fueron incluidos siete factores de seguridad alimentaria, se encontró que las grandes expansiones de tierras de cultivo en la zona Tropical Húmeda y en los Desiertos de América del Norte, estaban asociadas con una seguridad alimentaria muy reducida (valores de FEE fuertemente negativos). Este resultado invita a repensar la lógica detrás de la promoción de la expansión extensiva de las tierras de cultivo con incentivos para lograr la seguridad alimentaria. El análisis de la FEE, mostró que la creencia generalizada de que a nivel nacional la seguridad alimentaria podría haber mejorado desde 2002, derivada de la mejora de la autosuficiencia de la carne de bovino no es cierta. De hecho, la expansión de las tierras de pastoreo se correlacionó con la disminución de la seguridad alimentaria para todas las zonas excepto dos ecorregiones de las siete del país (Elevaciones semiáridas del sur y Sierras templadas); al mismo tiempo que la expansión de las tierras de cultivo se correlacionó con el aumento de la seguridad alimentaria únicamente para tres

ecorregiones (Elevaciones semiáridas del sur, Sierras templadas y Grandes Planicies). Es decir, la expansión de tierras de cultivos está levemente más asociada con la seguridad alimentaria en México que la expansión de tierras para actividades ganaderas.

El modelo conceptual propuesto para evaluar la seguridad alimentaria rural en México incluyó tres pilares: disponibilidad, accesibilidad y utilización de los alimentos. Se obtuvo un ajuste aceptable a los datos para tres métricas reconocidas, traducido como robustez en el modelo propuesto. La dirección de las relaciones generalizadas entre las variables fue consistente con las expectativas teóricas del modelo conceptual. La mayor parte de la variabilidad de la seguridad alimentaria rural se explicó por la accesibilidad a los alimentos (el índice de acceso a los alimentos) y por la utilización de los alimentos (derecho a la atención sanitaria pública). Dado que se encontró que el índice de pequeños agricultores tenía una relación significativa y positiva con todos los aspectos de la seguridad alimentaria, nuestro modelo sugirió que la presencia de sistemas agrícolas de pequeños agricultores se relaciona con una mayor seguridad alimentaria en México. Dentro de la agricultura en pequeña escala, la tenencia de la tierra ejidal (una estructura agraria de mancomunidad), la diversidad de cultivos y la diversificación económica son atributos de una mayor seguridad alimentaria (relación positiva y significativa en dos de los aspectos de la seguridad alimentaria). Por el contrario, la expansión de las tierras agrícolas está relacionada negativamente con la accesibilidad y la utilización de los alimentos, resultado que hace pensar que el establecimiento de una agricultura comercial extensiva, utilizada como bandera histórica para el aumento de la producción de alimentos, en realidad perjudica la seguridad alimentaria rural en a nivel México.

Sin embargo, se ha comprobado que los fuertes atributos de la agricultura comercial son beneficiosos para la seguridad alimentaria en ciertas ecorregiones. La práctica del riego (valor del índice de agricultura de temporal), la comercialización en el mercado (valor del índice de subsistencia bajo) y la tenencia privada de la tierra tienden significativamente a fomentar la seguridad alimentaria en muchos casos. La nueva generación de modelos espaciales será de utilidad al hacer explícito el proceso espacial multivariado a través de un modelo lineal de co-regionalización (análisis de varianza/covarianza estimado a través de diversos rangos de distancias). Además, se sugiere explorar los alcances de modelación de dinámica de sistemas que permita aproximar las relaciones no lineales y con múltiples ciclos de sausalidad circular. Finalmente, tanto el índice FEE como el modelo conceptual y analítico propuesto tendrán que insertarse en un trabajo interdisciplinario con especialistas en ecología, agronomía, sociología, epidemiología y salud pública. Esto permitirá, por un lado, co-construir y afinar el planteamiento de los factores relacionados con la seguridad alimentaria que reflejen las realidades multidisciplinares; y por otro lado, incrementar el potencial de incidencia y promover el impostergable tránsito hacia la investigación acción para el desarrollo territorial a partir del enfoque integrador de los sistemas socioecológicos.

INTRODUCCIÓN

El debate actual sobre seguridad alimentaria - *situación en la que todas las personas tienen acceso físico, social y económico permanente a alimentos seguros, nutritivos y en cantidad suficiente para satisfacer sus requerimientos nutricionales y preferencias alimentarias, y así puedan llevar una vida activa y saludable* - (FAO, 2002), ha evidenciado la necesidad de conocer el papel de la estructura agrícola y la dinámica espacio-temporal en interacción con el capital natural, y su potencial asociación con los pilares que la constituyen (disponibilidad, accesibilidad y utilización de los alimentos) (Eriksen, 2012). Por su parte, la estructura agrícola puede ser analizada a través de la integración del tamaño de la unidad de producción a través del índice de pequeños productores, destino de la producción mediante el índice de subsistencia, origen de los ingresos a través del índice de diversidad económica, diversidad de cultivos, tipo de agricultura a través del índice de temporal, y tipo de tenencia de la tierra. Desde 2008, derivado de la crisis financiera global o gran recesión, el abordaje de seguridad alimentaria presentó un punto de inflexión en torno a la reflexión de la posible necesidad de transitar del paradigma productivista basado en suministros para atender los problemas de seguridad alimentaria, a un enfoque de sistemas alimentarios asociados, entre varias aristas, con la consideración de los impactos ambientales de la producción, distribución y consumo de alimentos (Lang et al., 2009; Popkin, 2009; Nellemann, 2009; Lawrence et al., 2013). Dichas consideraciones propician una serie de tensiones entre los viejos y nuevos paradigmas que orientan los análisis y debate en torno a seguridad alimentaria. Mismas que, enmarcadas en la teoría de la sustentabilidad, requiere de nuevas concepciones y prácticas de los procesos socio-ambientales, a través de las cuales se potencie la gestión del territorio como recurso y factor indispensable de desarrollo y no, como el simple soporte físico de las actividades humanas y los procesos económicos. Lo anterior exige marcos analíticos integradores, por ello el abordaje enmarcado en el enfoque de sistemas socio-ecológicos¹ (SSE) resulta de utilidad, pues este hace explícita la estructura y dinámica de componentes sociales y ambientales, y el acoplamiento del manejo del territorio con la población local y las instituciones gubernamentales y no gubernamentales relacionadas (Ostrom, 2009).

Los SSE agrícolas son la base de los sistemas alimentarios a nivel global, en estos, existe una gran diversidad de manejos; desde los industriales con un manejo intensivo y propósitos comerciales, hasta los de pequeña escala con un manejo menos intensivo y propósitos de subsistencia (Hurni et al., 2015). Los sistemas agroalimentarios pueden ser vistos como SSE que se sostienen sobre una amplia diversidad de ecosistemas, y son gestionados por una variedad de actores que complejizan su entendimiento y planeación (Marshall, 2015). Las personas obtienen de los SSE agroalimentarios beneficios que usan como parte fundamental de sus ingresos y de su alimentación; a su vez, los ecosistemas sobre los cuales reposa la actividad agrícola se ven impactados por las decisiones y prácticas en torno a la producción (Binder et al., 2013; Solórzano, 2016; Antoni et al., 2019). La constante comunicación e impactos multidireccionales entre los sistemas ecológicos y sociales en torno al sostenimiento de los SSE agroalimentarios, la variedad de escalas temporales y espaciales,

¹ Concepto asociado a una diversidad de formas de vincular las relaciones naturaleza-sociedad, sistemas naturales-humanos acoplados, relaciones humano-ambientes; sistemas socioambientales, entre otros (Ávila-Foucat & Perevochtchikova, 2019).

intereses económicos e historias de vida, hacen que el estudio de la seguridad alimentaria sea prioritaria y extremadamente difícil. A pesar de la dificultad del abordaje interdisciplinario y transdisciplinario, la oportunidad de intervención para el estudio de SSE está en el diseño adecuado de modelos de investigación y monitoreo efectivo a largo plazo que involucren diversos tipos de conocimiento (Acevedo, 2011). Una de las principales formas para medir la seguridad alimentaria en el mundo y en particular en México, se ha realizado a través de la construcción de índices e indicadores derivados de fuentes oficiales (e.g. CONEVAL, ENSANUT, Hunger index, Food security index), cuyos alcances no consideran componentes clave del sistema agroalimentario. Estas métricas siguen respaldando el antiguo paradigma de fomento productivo en el mundo. Aunque se reconoce la importancia de dichos esfuerzos, existe un amplio vacío de información y análisis para abordar la relación entre la estructura agrícola y la seguridad alimentaria de zonas rurales, porque, aunque en estas zonas se sostiene la demanda de las ciudades, en ocasiones no se suplen los requerimientos alimenticios y son las que registran mayores tasas de desnutrición (ENSANUT, 2018). Además, se tiende a generalizar la variabilidad inter e intrarregional dentro de los espacios rurales. En ese sentido las ecorregiones se han reconocido como un concepto útil en términos de planeación y conservación, al ser unidades espaciales discretas que representan una zonificación de características homogéneas de variables biogeoclimáticas, a su vez, marca la pauta para aquellas actividades humanas que dependen directamente o indirectamente de aspectos meteorológicos.

Una expresión visible del impacto de los SSE agroalimentarios sobre los sistemas ecológicos en el mundo es la expansión agrícola, globalmente la agricultura se ha expandido brutalmente para suplir la creciente demanda del sistema agroalimentario sigue la historia de los asentamientos humanos (el tránsito del nomadismo al sedentarismo) y el orden económico mundial. La huella mundial de los sistemas agrícolas es enorme; por ejemplo, las tierras de cultivo abarcan una superficie del tamaño de América del Sur y las de pastoreo una superficie del tamaño de África (Foley et al., 2005; Laurance et al., 2014). A pesar de ello, la presión para aumentar la extensión de tierras destinadas a la producción de alimentos aumentará en los años futuros. La población mundial superó los 7,000 millones de habitantes en 2011 y se prevé que se acerque a los 11,000 millones a finales de este siglo (ONU, 2013), lo que implicará producir más alimento a expensas de la expansión agrícola, la tecnificación y mayor demanda de recursos naturales. La conversión de bosques y otros ecosistemas en tierras agrícolas se ha producido a un ritmo medio del 0.8% anual durante los últimos 40-50 años y es el principal factor mundial que provoca la pérdida de funcionamiento y servicios de los ecosistemas (MEA, 2005). La humanidad puede estar llegando a un punto en el que una mayor expansión de las tierras agrícolas a escala mundial puede amenazar seriamente la biodiversidad y socavar las capacidades reguladoras del sistema terrestre al afectar al sistema climático y al ciclo hidrológico. En México entre 1993 y 2007 los bosques templados, los bosques secos tropicales y los matorrales fueron las coberturas naturales más afectadas en términos de extensión, mientras que los bosques tropicales siempre verdes y los pastizales naturales perdieron proporcionalmente más extensión en comparación con las otras coberturas naturales; la expansión agrícola ha sido la causa del 40 % - 80 % de esa pérdida de vegetación natural (dependiendo del ecosistema del que se hable) (Mendoza-Ponce et al., 2017). Por ello, un objetivo importante de la política de uso de suelo en el país ha sido, en las últimas tres décadas, aumentar la seguridad alimentaria (Yúñez et al., 2013) y reducir las actividades que contribuyen al cambio global (por ejemplo, Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección del Medio Ambiente, 1988). En lo que va del siglo XXI, ha habido un debate amplio respecto a la racionalidad y veracidad de subsidiar algunos de los principales sistemas de

producción de alimentos y seguir afirmando que se protege con estos a los principales reservorios de biodiversidad (Muñoz-Piña et al., 2008; Schmook y Vance, 2009; Sarukhán et al., 2015), sabiendo ampliamente que la expansión agropecuaria en las últimas cuatro décadas ha impactado negativamente en grandes magnitudes a las regiones altamente biodiversas de México (Velázquez et al., 2003; Mas et al., 2004; Bonilla-Moheno et al., 2013; Moreno- Sánchez et al., 2014). Por todo lo anterior, se propone el siguiente sistema de preguntas en la presente investigación:

✓ **Sistema de preguntas que orientaron la Investigación**

1. ¿En qué ecorregión(es) ocurre el mayor avance en seguridad alimentaria durante el intervalo de tiempo a analizar?, ¿Existe una correlación entre la seguridad alimentaria de las ecorregiones y la expansión de los sistemas de producción agrícolas?
2. De los principales sistemas agropecuarios extendidos en el territorio mexicano (maíz, arroz, trigo, frijol, ganado bovino, porcino y ovino), ¿Cuáles son los que impulsan la autosuficiencia alimentaria?
3. ¿Qué características del sistema agrícola y del contexto territorial en México potencian y dificultan la seguridad alimentaria rural?, ¿Los factores que potencian la seguridad alimentaria rural en el territorio nacional son los mismos que impulsan la seguridad alimentaria rural dentro de ecorregiones específicas en México?
4. ¿La presencia de pequeños sistemas agrícolas promueve la seguridad alimentaria rural?, ¿Qué características de la agricultura a pequeña escala se relacionan con la seguridad alimentaria rural?, ¿Existe una asociación positiva entre la presencia de agricultura comercial (industrial) y la seguridad alimentaria rural?

✓ **Objetivo General**

Evaluar la seguridad alimentaria a partir de la dinámica espacio-temporal de la expansión agropecuaria y la estructura del sistema agrícola en las distintas ecorregiones de México.

✓ **Objetivos Particulares**

1. Formular un índice de eficiencia alimentaria - ambiental a partir de la relación emergente entre el cambio de uso de la tierra y tendencias de seguridad alimentaria (acceso a los alimentos y autosuficiencia alimentaria) en las distintas ecorregiones de México.
2. Proponer un modelo de análisis para la seguridad alimentaria rural en México incorporando aspectos de disponibilidad, accesibilidad y utilización de los alimentos.

3. Identificar los factores de los sistemas agrícolas que potencian y dificultan la seguridad alimentaria rural del país que aporten conocimiento útil para la toma de decisiones en torno a políticas agrícolas en México.

✓ **Hipótesis**

1. El índice de eficiencia alimentaria mostrará que el cambio de uso del suelo (expansión agrícola) no tiene un impacto positivo en la seguridad alimentaria en las ecorregiones de México.
2. Los factores típicos de los sistemas agrícolas de subsistencia estarán mayormente asociados al mantenimiento de la seguridad alimentaria rural en comparación con factores que caracterizan a la agricultura comercial.

✓ **Estructura Capítular**

La presente investigación se estructuró en los siguientes capítulos: 1) **Marco teórico**, en el que se aborda el papel del marco analítico de los sistemas socio-ecológicos, los sistemas agroalimentarios y la seguridad alimentaria como su principal expresión de salida en los análisis (mediciones globales y nacionales y los vínculos entre la seguridad alimentaria y la estructura del sistema agrícola); 2) **Marco de referencia**, donde se presentan los antecedentes asociados al abordaje práctico de los índices de seguridad alimentaria y el uso de sistemas de información geográfica para abordar el marco de sistemas socioecológicos y la seguridad alimentaria; 3) **Métodos**, donde se describe el área de estudio, los insumos empleados y los marcos metodológicos usados para la construcción del índice de seguridad alimentaria propuesto y de los modelos de ecuaciones estructurales; 4) El **Índice de Eficiencia Alimentaria y Ambiental en México**, este capítulo incluye un resumen en español e inglés y el artículo correspondiente a la publicación del 2018; 5) El **Enlace de la estructura de los sistemas agrícolas y la seguridad alimentaria rural en México**, este capítulo incluye un resumen en español e inglés y el artículo correspondiente a la manuscrito recientemente sometido a la revista Agriculture and food security; y finalmente 6) **Conclusiones y Perspectivas** con énfasis en los principales resultados obtenidos y potenciales abordajes futuros de la presente investigación.

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1 Sistemas Socioecológicos (SSE)

Desde la primera formulación conceptual de Von Bertalanffy (1968) de un marco general para la comprensión de los principios organizativos de los sistemas vivos, tanto la noción de sistema como el enfoque del pensamiento sistémico han disfrutado de una amplia aplicación en una variedad de disciplinas (Preiser et al., 2018). A partir de la segunda mitad del siglo XX, se llevaron a cabo diversos esfuerzos para comprender las relaciones entre los ecosistemas y la sociedad, y cómo estos se retroalimentan mutuamente. El abordaje se logró a partir del desarrollo de estudios que transitaron de enfoques netamente disciplinarios a multidisciplinarios e interdisciplinarios, los cuales dieron visibilidad y sustento a las relaciones sociedad-ecosistemas en una serie de encuentros de alcance internacional en los cuales se hizo evidente la crisis ambiental planetaria (Bac, 2018). Con la publicación del Informe Brundtland y la introducción del concepto de desarrollo sostenible, que implica satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de satisfacer las necesidades futuras (CMMAD, 1987), se dio pauta a una serie de directrices en materia social, económica y ambiental de alcance internacional. A partir de esos esfuerzos y ante la necesidad de hacer operativo el concepto de desarrollo sostenible surgió el concepto de **Sistemas Socioecológicos (SSE)**, también llamados sistemas socialecológicos acoplados, sistemas humano-ambientales o socioecosistemas. Los sistemas socioecológicos son sistemas anidados, dinámicos y multinivel en donde los componentes social y natural se encuentran interconectados y de cuyas interrelaciones se derivan procesos de co-evolución a través de diferentes escalas espacio-temporales (Hanspach et al., 2014; Folke, 2006), que van desde la local hasta global, en función del enfoque SSE (Ávila Foucat & Perevochtchikova, 2019; Palomo et al., 2014; Binder et al., 2013). En un sistema socioecológico, los componentes social y natural interactúan de tal manera que éstos últimos proveen de beneficios esenciales a la sociedad, tales como alimento, agua, energía, entre otros; mientras que los ecosistemas son afectados por las actividades y decisiones humanas que

modifican su estructura y función (Liu et al., 2007; Ostrom, 2009; Ostrom et al., 2012; Muradian et al., 2015; Berkes, 2017; Petrosillo et al., 2015).

Dada las características complejas per se de los sistemas socioecológicos, se requieren de marcos de estudio integrales o analíticos que permitan abordar las interacciones entre los sistemas sociales, ambientales y económicos, así como comprender sus dinámicas (Petrosillo et al., 2015). Existen diferentes enfoques empleados para abordar los SSE (Binder et al., 2013), los cuales se han venido agrupando a lo largo de los últimos 20 años en tres marcos dominantes (originales, robustos y multiniveles) con base en su aplicación, vinculados a la descripción y diagnóstico, diversidad que ha propiciado que el concepto SES aún carezca de una definición unificadora (Colding & Barthel, 2019). Una forma de abordar y conceptualizar la complejidad de los sistemas socioecológicos es a partir del marco de sistemas complejos adaptativos (Berkes, 2017). Pese a que la definición de sistema complejo adaptativo pudiese parecer simplista al referirse a éste como “un sistema en el cual el comportamiento de un nivel macro emerge de la influencia de las interacciones de elementos en un nivel micro del sistema” (Roundy et al., 2018); hace énfasis en la red adaptativa, propiedades o acciones de sus componentes, las cuales no representan solamente un comportamiento agregado del sistema (Willy et al., 2003; Holland, 1992). De acuerdo con Brownlee (2007), los sistemas complejos adaptativos son un ente “compuesto por poblaciones de agentes cuyas interacciones resultan de un complejo de dinámicas no lineales a partir de las cuales emergen fenómenos del sistema”. En ese sentido, las principales propiedades colectivas asociadas a los sistemas complejos adaptativos y, por ende, de los sistemas socioecológicos son las siguientes:

- **No linealidad.** La capacidad de comprender enteramente las dinámicas en un sistema complejo no es predecible. El dinamismo y las múltiples interacciones colaborativas y de auto-mejora, así como a la retroalimentación que existe en un sistema complejo, no permite entender su comportamiento a partir de criterios de proporción, pues siempre existe incertidumbre (Ladyman & Wiesner, 2011). En términos generales, la no linealidad de un sistema complejo significa que no aplica el principio de superposición que se refiere a que “si se añaden dos soluciones y se obtiene otra, y se multiplica cualquier solución por un factor se obtiene otra”. Sin embargo, pese a ser una propiedad de los sistemas complejos, la no linealidad no es necesariamente una condición (Ladyman & Wiesner, 2011).
- **Retroalimentación.** Esta propiedad se refiere al estímulo-respuesta derivado de las interacciones de los componentes del sistema (Ryan et al., 2007). Los subsistemas del sistema socioecológico (social, ecológico y económico) cuentan con un entramado de interconexiones con circuitos de retroalimentación que tienen un comportamiento no lineal y multinivel, los cuales interactúan a su vez en un proceso de auto-organización del sistema (Ryan et al., 2007). La retroalimentación puede ser positiva o negativa (Holland, 2006), de acuerdo con Hull et al. (2015) la retroalimentación positiva sucede cuando un estímulo provoca un efecto de amplificación que refuerza el cambio en el sistema; mientras que la retroalimentación negativa ocurre cuando el estímulo causa un efecto amortiguador que hace decrecer o revierte los cambios en el sistema.
- **Organización jerárquica.** El sistema socioecológico está organizado en diversos niveles de estructura cuyos componentes interactúan entre sí, es decir, se trata de sistemas o subsistemas

que conforman una entidad (Ladyman & Wiesner, 2011). Existen jerarquías anidadas y no anidadas, siendo la primera aquellas que incluyen una composición jerárquica en donde los altos niveles son compuestos por niveles más bajos, mientras que, en el segundo caso, pueden observarse asimetrías en las relaciones entre nivel sin que alguno contenga o sea parte de otro (Wu, 2013; Allen & Starr, 1982). El concepto de jerarquía es cercano al de niveles de organización, no obstante, la organización jerárquica de un sistema no garantiza la eficiencia y estabilidad del sistema, pues puede contener muchos niveles, o bien, tener niveles muy rígidos y con altos controles de arriba hacia abajo (Wu, 2013; Wilson, 1969).

- **Auto-organización y emergencia.** La auto-organización se trata de un proceso interno del sistema que resulta de las interacciones de sus componentes y que, regularmente, es independiente de la naturaleza física del sistema (Fenzl, 2017). De acuerdo con Heylighen (2008), el sistema mantiene su organización básica más allá de los cambios del ambiente, es decir, el sistema auto-organizado es intrínsecamente adaptativo. El concepto de auto-organización está relacionado con el de emergencia, el cual se refiere a la aparición de una nueva propiedad global del sistema que no había sido observada previamente, y que es producto de dinámicas e interacciones no lineales entre los componentes, e implica que los patrones emergentes son más que la suma de las partes que componen al sistema (Brownlee, 2007).
- **Múltiples estados estables.** Debido al comportamiento no lineal de las interrelaciones y las dinámicas emergentes, dentro del constante cambio del sistema los componentes pueden permanecer dentro de un estado estable, en donde pueden operar dentro de límites impuestos por propiedades del medio ambiente (Ryan et al., 2007; O'Neil et al., 1989). Por otro lado, operar dentro de un estado estable no implica balance natural o equilibrio del sistema, por lo que las condiciones de estabilidad pueden cambiar ante perturbaciones externas o retroalimentación (Holling, 1973). Por ello, el sistema puede experimentar múltiples estados estables que estarán relacionados con la velocidad de cambio del sistema mismo y la capacidad de adaptar su estructura y funciones (Ryan et al., 2007).
- **Co-evolución.** Esta propiedad se traduce en una mejora en el desenvolvimiento de los agentes derivado de cambios o adaptaciones en sus interacciones a través del tiempo y espacio (Holland, 2006). De acuerdo con Heylighen (2008), las interacciones entre los agentes no son óptimas, pues de tal vínculo un agente se puede beneficiar mientras que otros no. Cuando los agentes obtienen salidas positivas de las interacciones, se puede decir que existe sinergia. Los agentes tienden a organizarse a sí mismos en donde existe una mejor situación. Dado que los agentes se adaptan mutuamente y coordinan sus acciones para minimizar el conflicto y maximizar la sinergia, y mantienen o abandonan acciones a favor de su función, se puede decir que existe una co-evolución entre los componentes (Heylighen, 2008).
- **Adaptación del sistema.** La adaptación es una propiedad del sistema que resulta del aprendizaje derivado del comportamiento emergente y la tensión entre retroalimentación positiva y

negativa (Ryan et al., 2007; Holland, 1995). La adaptación es definida por Merelli et al. (2015) como *un proceso que impulsa la evolución y el desarrollo de los agentes del sistema, que adaptan sus características y cambian su configuración con el fin de sobrevivir al hábitat actual y, con ello, lograr un mayor nivel de aptitud para reaccionar adecuadamente a estímulos externos*. De acuerdo con Folke et al. (2010), la adaptabilidad le permite al sistema aprender y combinar experiencias y conocimientos para ajustar sus respuestas al cambio ante impulsores externos y procesos internos. El concepto de adaptación está estrechamente relacionado con el de **resiliencia** y **resistencia** (no cambio), que en ocasiones son usados erróneamente como sinónimos pero que no son lo mismo (Pretty, 2008). La resiliencia es definida como la capacidad del sistema para responder al cambio o perturbación sin cambiar su estado básico” (Holling, 2002; Urruty et al., 2016). En ese sentido, la resiliencia corresponde a la capacidad de los sistemas socioecológicos de absorber disturbios recurrentes manteniendo su estructura, procesos y retroalimentación que le resultan esenciales (Adger et al., 2005). El concepto de resistencia, por otro lado, se refiere a la capacidad del sistema para mantener la estructura y función sin cambios ante disturbios (Pretty, 2008; Isbell et al., 2015). Cabe destacar que existen diferentes posicionamientos respecto a su aplicación desde ciencias sociales, como concepto universal y unificador, dada la ausencia de conceptos claves dentro de teorías sociales como es el caso de conflicto, poder, conocimiento, entre otros (Olsson et al., 2015).

La percepción de los SSE como sistemas integrados se ha convertido en la base de una corriente principal en la búsqueda de soluciones a los problemas de la transición hacia un futuro más justo y sostenible para la humanidad y la tierra (Folke et al., 2011; 2016; Biggs et al., 2012; Levin et al., 2013; Fischer et al., 2015). La comprensión de la naturaleza del SES plantea nuevas fronteras para estudiar, gobernar e influir en él (Biggs et al., 2015b; Bodin, 2017; Österblom et al., 2017). Debido a que nuestro conocimiento del SSE es parcial y divergente a lo largo del tiempo, la mejor estrategia para el desarrollo de un entendimiento integrado del SSE es explorar una variedad de modelos que abarcan un amplio espectro de metodologías y divisiones disciplinarias (Cilliers, 2002; Poli, 2013; Tengö et al., 2014). Los fenómenos complejos de los SSE se constituyen de manera relacional a través de interacciones dinámicas que forman patrones de comportamiento emergentes. Por lo tanto, es necesario un cambio de perspectiva que permita capturar y entender las relaciones (Capra & Luisi, 2014) que no pueden ser medidas en términos netamente de causas materiales. Saber que la naturaleza de la realidad es compleja tiene consecuencias reales en la forma en que se eligen los métodos y enfoques prácticos para observar, analizar y modelar las relaciones socioecológicas entrelazadas del mundo real. Por ello, para producir datos empíricamente válidos y significativos e interpretaciones de la diversidad de las características y propiedades del SSE, se necesita exponer y entender las relaciones causales subyacentes, los patrones y los procesos que generan la información sistémica, los comportamiento, patrones y eventos que rigen los impulsores antropogénicos y no antropogénicos y las condiciones socioecológicas (Capra, 2005; Österblom et al., 2013). Decidir qué métodos y modelos son apropiados no es obvio, y las elecciones se hacen a menudo por motivos subjetivos como la experiencia, la utilidad o incluso la intuición (Mingers, 2000, Audouin et al., 2013; Cilliers et al., 2013), reconociendo siempre que los modelos derivados del análisis de los SSE son simplemente aproximaciones (Preiser et al., 2018).

Comprometerse con los problemas del mundo real desde una perspectiva basada en SSE no favorece ni exige prácticas o enfoques fundados en visiones constructivistas del mundo que propaga

el relativismo. De hecho, es todo lo contrario. El argumento contra el relativismo se basa en la observación de que los SSE no son sistemas caóticos. Para que un sistema tenga sentido, necesita una estructura y procesos organizativos que resulten en patrones de comportamiento reconocibles que, a su vez, ejerzan ciertas restricciones sobre el sistema. Las reglas o normas son ejemplos de tales restricciones, pero éstas son restricciones habilitantes que permiten la interacción. Si no hubiera reglas o normas, las sociedades o sistemas se desmoronarían. Por lo tanto, las restricciones están relacionadas tanto con la estructura y la función del SSE como con las capacidades y contextos habilitantes en los que existe y se desarrolla (Cilliers, 1998). Las normas son, de hecho, el resultado de interacciones complejas y dinámicas y constituyen limitaciones sensibles al contexto, que nos permiten actuar. Tal comprensión de la agencia normativa no nos compromete ni al relativismo ni a la elección aleatoria porque todas las posiciones o modelos no son igualmente aceptables (Preiser & Cilliers, 2010; Woermann & Cilliers, 2012). Los enfoques basados en SSE proporcionan directrices para proceder de manera diferente en este mundo y piden modos más inclusivos e integradores de involucrarse en los problemas del mundo real que sean conscientes de cómo el bienestar humano está integrado en la biosfera. La implementación activa de estrategias que favorezcan la integración de la naturaleza, la sociedad y la tecnología debería convertirse en una norma social central en los debates sobre la formulación de políticas. Los procesos participativos y de colaboración entre múltiples interesados directos que fomentan el diálogo y la co-creación de conocimientos y el desarrollo de una conciencia sistémica entre los miembros de las diferentes comunidades deben ser alentados desde arriba hacia abajo en el proceso de toma de decisiones (Hammond, 2005).

1.2 Sistema Agroalimentario como SSE

Un avance significativo en la comprensión de los desafíos en la búsqueda de la seguridad alimentaria, es decir de las limitantes que existen para que todas las personas tengan acceso físico, social y económico permanente a alimentos seguros, nutritivos y en cantidad suficiente para satisfacer sus requerimientos nutricionales y preferencias alimentarias, y así puedan llevar una vida activa y saludable, ha sido resultado de la creciente atención que se presta al concepto de sistemas agroalimentarios en la comunidad de investigación internacional centrada en el cambio ambiental global (CAG). Los **sistemas agroalimentarios** abarcan las cadenas de valor de los alimentos en la medida en que incluyen "una cadena de actividades que van desde la producción ("el campo") hasta el consumo ("la mesa"), con especial énfasis en el procesamiento y la comercialización y en las múltiples transformaciones de los alimentos que éstas conllevan" (Ericksen, 2008a). Los defensores de este concepto sostienen que el análisis exhaustivo de cómo afectan estas cadenas a la seguridad alimentaria requiere una definición más amplia del sistema agroalimentario que la de una cadena de actividades. Hammond & Dube (2012) destacaron cómo los sistemas agroalimentarios se ven afectados por factores biofísicos de mayor escala (por ejemplo, cambios en los patrones climáticos, condiciones ambientales) y factores sociopolíticos (por ejemplo, desarrollo económico, urbanización, normas sociales) y las complejas interacciones entre ellos. Con cerca del 40% de la superficie terrestre ocupada por la agricultura (Alston & Pardey, 2014), incluyendo Godfray et al. (2010), han enfatizado en la importancia de satisfacer la creciente demanda de alimentos de manera que sea ambiental y socialmente sostenible. Los sistemas agroalimentarios pueden ser vistos como sistemas naturales-humanos acoplados que poseen (i) interacciones entre y dentro de los ambientes biofísicos y humanos (Ericksen, 2008a) (Figura 1), que determinan un conjunto de actividades; (ii) actividades en sí mismas (desde la producción hasta el consumo); (iii) resultados de

las actividades (contribuciones a la seguridad alimentaria, la seguridad ambiental y el bienestar social); y (iv) otros determinantes de la seguridad alimentaria (Marshall,2015).

Una contribución significativa del concepto de sistema agroalimentario para comprender la participación de los pequeños agricultores en las cadenas alimentarias de alto valor se deriva de sus orígenes en la compleja metodología de sistemas que se suele seguir en la comunidad de investigación del CAG. Desde esta perspectiva, las dinámicas sociales y naturales de un sistema agroalimentario particular son las de un SSE, es decir un sistema agroalimentario visto como un tipo de sistema adaptativo complejo cuyo comportamiento emergente puede surgir en múltiples niveles de varias escalas del sistema (por ejemplo, espacial, temporal, jurisdiccional) como consecuencia de la interacción de numerosas entidades. Las condiciones sociales y naturales co-evolucionan de tal manera que los cambios en una provocan adaptaciones en la otra. Por lo tanto, es de esperar que se produzcan sorpresas en el comportamiento del SSE alimentario, lo que hace que la creación de capacidades de adaptación y transformación sea importante para gestionar la vulnerabilidad, la resistencia y la solidez del sistema (Ericksen, 2008a,b). La investigación sobre los sistemas agroalimentarios supone un reto porque "las soluciones para gestionar el cambio medioambiental y garantizar la seguridad alimentaria requieren un nuevo programa de investigación integrado y multidisciplinar" (Ericksen et al., 2009). El desafío se amplía porque cada una de las disciplinas de investigación involucradas tiene su propia terminología, técnicas y formas de datos (Hammond & Dube, 2012). Los problemas del sistema agroalimentario implican interacciones complejas a través de múltiples escalas (por ejemplo, social, ecológica e institucional), por lo que un cuidadoso diagnóstico multidisciplinario de cada uno de estos problemas es vital para identificar respuestas bien adaptadas a sus atributos únicos (Marshall,2015).

El marco de SSE está bien situado para hacer frente a este desafío, siempre que se introduzcan modificaciones para que los elementos de transformación del sistema agroalimentario puedan tenerse en cuenta como parte del SSE focal. Es coherente con el marco de sistemas agroalimentarios propuesto por Ericksen (2008a,b) para estructurar la integración de los esfuerzos de investigación en este ámbito. Los sistemas alimentarios pueden ser analizados cuando se entienden como un SSE, porque este marco logra acumular una base de conocimientos compartidos entre las disciplinas sobre cómo las combinaciones de determinadas variables sociales y biofísicas afectan conjuntamente a los resultados en entornos complejos, y este conocimiento compartido sirve para sustentar un enfoque de diagnóstico del diseño institucional capaz de abordar el "problema de la panacea" que "se produce cuando se aplica una única solución presunta a una amplia gama de problemas" (Ostrom & Cox, 2010). El marco de los SSE, debe ser "totalmente interdisciplinario, con el objetivo de conjugar las ciencias naturales y las ciencias sociales...". En el caso del sistema agroalimentario, el SSE comprende cuatro conjuntos de actividades (producción de alimentos, procesamiento de alimentos, envasado y distribución de alimentos, y venta al por menor/consumo de alimentos), así como tres conjuntos de resultados de estas actividades (seguridad alimentaria, bienestar social e impactos ambientales que contribuyen al cambio global y son conocidos como patrones emergentes) (Marshall,2015). Otra razón para basarse en el marco de SSE es que ya ha sido ampliamente aplicado, criticado y perfeccionado (por ejemplo, Fleischman et al., 2010; Ostrom & Cox, 2010; Basurto & Nenadovic, 2012; Schlüter & Madrigal, 2012; Epstein et al., 2013; Garrick et al., 2013; Basurto et al., 2013; McGinnis & Ostrom, 2014; Nagendra & Ostrom, 2014; Partelow, 2015). También es significativo el hecho de que el marco de SSE se haya elaborado a partir del marco

de Análisis y Desarrollo Institucional (ADI), que ha sido aplicado (Marshall, 2005; Ostrom, 2005), incluso por investigadores centrados en las cadenas de valor de los alimentos (por ejemplo, Devaux et al., 2009; Meinzen-Dick et al., 2009; Horton et al., 2011) y otros productos primarios (por ejemplo, Blam et al., 2000; Flinkman, 2004).

Dentro del SSE agroalimentario se tiene al subsistema ecológico que puede ser entendido a través de diversos niveles de agregación, por ejemplo, a nivel ecorregión o ecosistema, dichos niveles sostienen una amplia variedad de suelos, diversidad vegetal, animal y microbiana, y las condiciones climáticas y topográficas inherentes. Por su parte, el subsistema social está compuesto por actores (productores, transformadores, comercializadores y consumidores), instituciones (gubernamentales y no gubernamentales), reglas (constitucionales, operativas y de acción colectiva) y circuitos de comercialización (locales, regionales, nacionales e internacionales) (Figura 1). Este da forma a la estructura agrícola, es decir, las variables que conforman al sistema agrícola: tamaño de la unidad de producción, destino de la producción, origen de los ingresos, diversidad de cultivos, tipo de agricultura y tipo de tenencia de la tierra, son constructos del subsistema social que moldean las realidades sobre las cuales se desarrolla el sistema agroalimentario.

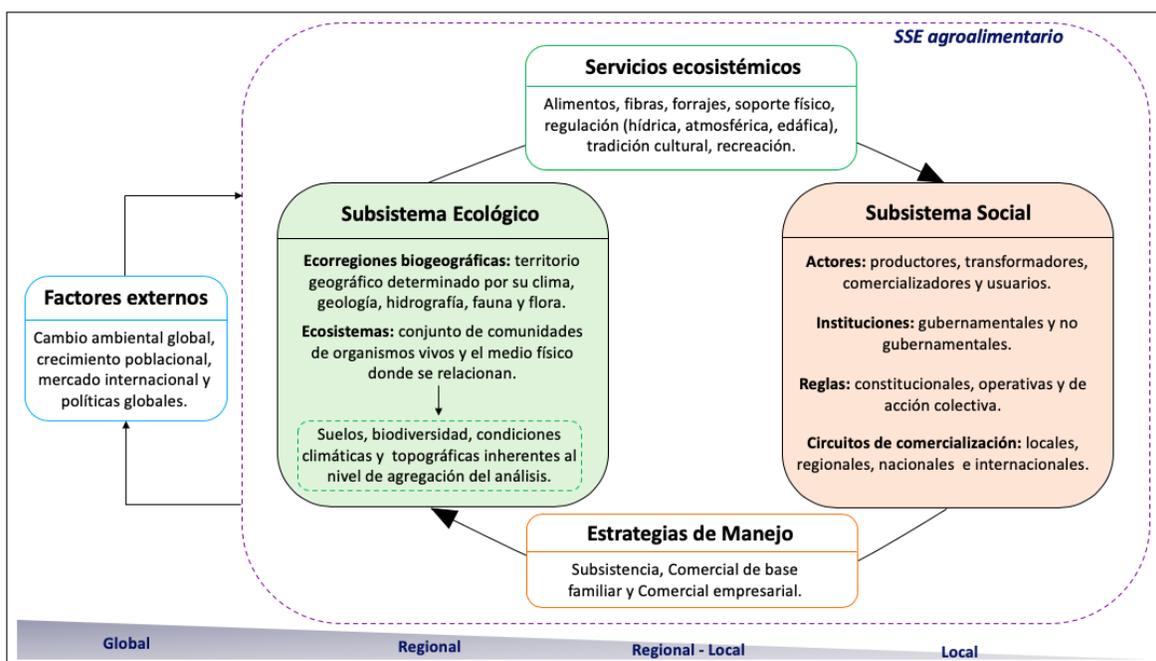


Figura 1. Sistema socioecológico agroalimentario. Elaboración propia.

Respecto a los pilares de la seguridad alimentaria, la utilización y la accesibilidad son propiedades igualmente impulsadas por el subsistema social; en contraste, la disponibilidad de alimentos es un resultado del potencial productivo del subsistema ecológico y de las capacidades de gestión emergentes dentro del subsistema social. La gestión varía ampliamente entre tipos de sistemas (subsistencia, comercial de base familiar o comercial empresarial), en ellas se pueden encontrar desde prácticas tradicionales hasta prácticas típicas de sistemas industrializados. Dichas estrategias de manejo impactan en mayor o menor medida sobre la integridad funcional del subsistema ecológico que las posibilita. A su vez, el subsistema ecológico aporta servicios ecosistémicos clave (por ejemplo, alimentos, fibras, forrajes, soporte físico, regulación hídrica, atmosférica y edáfica,

tradición cultural y recreación) para el bienestar de las poblaciones que dependen del sistema agroalimentario para cubrir los medios de vida y los requerimientos nutricionales (Figura 1). Finalmente, existen factores externos al SSE agroalimentario que lo impactan y son impactados por este, dentro de ellos, destaca el cambio ambiental global, el crecimiento poblacional, el mercado internacional que ha sido impulsado por una clase media emergente a escala global y las políticas planetarias (Alexandratos & Bruinsma, 2012; ONU, 2015).

1.3 Cambio Global

El crecimiento exponencial de las actividades humanas (sistema social) está despertando la preocupación de que una mayor presión sobre el Sistema de la Tierra (sistema ecológico) podría desestabilizar los sistemas biofísicos críticos y desencadenar cambios ambientales abruptos o irreversibles que serían perjudiciales o incluso catastróficos para el bienestar humano, que han sido agrupados en el gran concepto de cambio global. Para estimar un espacio operativo seguro para la humanidad con respecto al funcionamiento del sistema terrestre, surge el término de los límites planetarios. Los nueve límites planetarios cubren los ciclos biogeoquímicos globales de nitrógeno, fósforo, carbono y agua; los principales sistemas de circulación física del planeta (el clima, la estratosfera, los sistemas oceánicos); las características biofísicas de la Tierra que contribuyen a la resistencia subyacente de su capacidad de autorregulación (biodiversidad marina y terrestre, sistemas terrestres); y dos características críticas asociadas con el cambio global antropogénico (carga de aerosoles y contaminación química). Rockstrom et al., 2009, cuantificaron la trayectoria temporal de siete de los límites planetarios propuestos desde los niveles preindustriales hasta el presente (Figura 2).

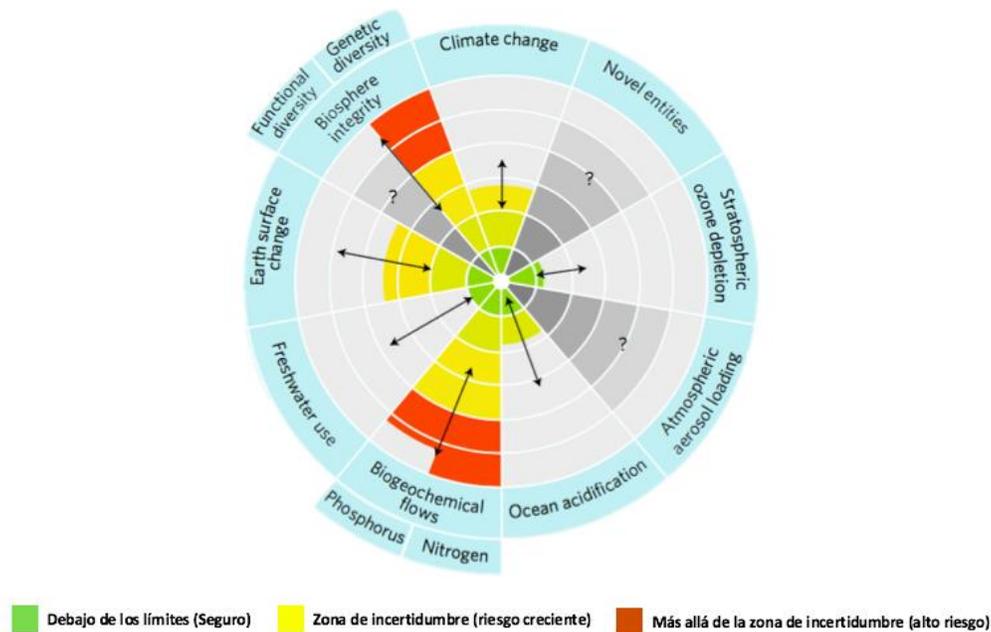


Figura 2. Estimación de la evolución cuantitativa de las variables de control para siete límites planetarios desde los niveles preindustriales hasta el presente. La verde se visualiza el espacio operativo seguro con los niveles límite propuestos en su contorno exterior, en amarillo una zona de incertidumbre en la que el riesgo es creciente y en tono rojizo una zona más allá de la incertidumbre en la que el riesgo es alto. Modificado de Rockstrom et al., 2009.

El crecimiento del uso de fertilizantes en la agricultura moderna, resultó en la transgresión de la frontera de la tasa de interferencia humana con el ciclo global del nitrógeno. Las estimaciones indican que la humanidad se está acercando a un ritmo rápido, a los límites del uso del agua dulce y del cambio de la superficie terrestre (cambio del uso del suelo). Los límites planetarios plantearon nuevas preguntas: "¿Cuáles son las precondiciones planetarias no negociables que la humanidad debe respetar para evitar el riesgo de un cambio medioambiental perjudicial o incluso catastrófico a escala continental y mundial? y ¿En donde están esos umbrales? Los umbrales se definen como transiciones no lineales en el funcionamiento de sistemas socioecológicos acoplados (Schellnhuber, 2002; Lenton et al., 2008), son características intrínsecas de esos sistemas y a menudo se definen por una posición a lo largo de una o más variables de control. Algunos procesos del sistema terrestre, tales como el cambio de uso de la tierra, no están asociados con umbrales conocidos a escala continental a mundial, pero pueden, mediante la disminución continua de funciones ecológicas clave (tales como el secuestro de carbono), causar colapsos funcionales, generando retroalimentaciones que desencadenan o aumentan la probabilidad de un umbral global en otros procesos (tales como el cambio climático) (Rockstrom et al., 2009). El sistema alimentario mundial es uno de los principales impulsores de cambio global, impacta negativamente sobre varios de los límites planetarios como lo son el cambio climático, el cambio en el uso de la tierra y la pérdida de biodiversidad, el agotamiento de los recursos de agua dulce, y la contaminación de los ecosistemas acuáticos y terrestres a través de la escorrentía de nitrógeno y fósforo procedente de la aplicación de fertilizantes y estiércol. Se prevé que la producción y el consumo de alimentos cambien entre 2010 y 2050 como resultado de la evolución socioeconómica prevista. Entre estos acontecimientos se incluye el crecimiento de la población mundial en aproximadamente un tercio (con un rango de 23-45%, de 6.900 millones en 2010 a 8.500-10.000 millones en 2050) y la triplicación del ingreso mundial (con un rango de 2.600-4.200 millones de dólares, de 68 billones de dólares en 2010 a 180-290 billones de dólares en 2050). Debido a estos cambios, se pronostica que las presiones ambientales del sistema agroalimentario aumentarán en un 50-92% para cada indicador (emisiones de gases de efecto invernadero, uso de tierra para cultivo, uso de agua, aplicación de nitrógeno y fosforo) en ausencia de cambios tecnológicos y otras medidas de mitigación (Springmann et al., 2018).

La expansión global de la agricultura para suplir la creciente demanda del sistema agroalimentario sigue la historia de los asentamientos humanos y el orden económico mundial. Comenzó en el Viejo Mundo, China e India, y la Unión Soviética, mientras que, en los últimos 50 años, las fronteras agrícolas se han desplazado hacia los trópicos, con nuevas fronteras establecidas en América Latina, el sudeste asiático y África. Mientras tanto, muchas regiones templadas del mundo fueron testigos de la estabilización de las tierras agrícolas e incluso del abandono (Herrero et al., 2018). El cambio del sistema terrestre, impulsado principalmente por la expansión e intensificación de la agricultura, contribuye al cambio ambiental mundial, con el riesgo de socavar el bienestar humano y la sostenibilidad a largo plazo (Foley et al., 2005, MEA, 2005). La conversión de bosques y otros ecosistemas en tierras agrícolas se ha producido a un ritmo medio del 0.8% anual durante los últimos 40-50 años y es el principal factor mundial que provoca la pérdida de funcionamiento y servicios de los ecosistemas (MEA, 2005). La humanidad puede estar llegando a un punto en el que una mayor expansión de las tierras agrícolas a escala mundial puede amenazar seriamente la biodiversidad y socavar las capacidades reguladoras del sistema terrestre al afectar al sistema climático y al ciclo hidrológico. Como límite planetario, se propuso que no más del 15% de la

superficie terrestre mundial libre de hielo se convierta en tierras de cultivo. Debido a que este límite es un agregado global complejo, la distribución espacial y la intensidad del cambio del sistema terrestre es de importancia crítica para la producción de alimentos, la regulación de los flujos de agua dulce y la retroalimentación del funcionamiento del sistema terrestre. Al establecer un límite terrestre en términos de cambios en el área cultivada, se reconocen las limitaciones que esta métrica conlleva dado el estrecho acoplamiento con los otros límites del uso del fósforo y nitrógeno, la tasa de pérdida de biodiversidad, y el uso global del agua dulce (Rockstrom et al., 2009).

Para que la humanidad permanezca dentro de este límite, las tierras de cultivo deben asignarse a las áreas más productivas, y deben controlarse los procesos que conducen a la pérdida de tierras productivas, como la degradación de la tierra, la pérdida de agua de riego y la competencia con los usos de la tierra como el desarrollo urbano o la producción de biocombustibles. También puede ser necesario gestionar los procesos relacionados con la demanda, como la dieta, el consumo de alimentos per cápita, el tamaño de la población y el despilfarro en la cadena de distribución de alimentos. Los **sistemas agrícolas** – *conjuntos de explotaciones de producción agrícolas individuales con recursos básicos, pautas empresariales, medios familiares de sustento y limitaciones en general similares, a los cuales corresponderían estrategias de desarrollo e intervenciones parecidas* – (FAO, 2002) que imitan mejor los procesos naturales (por ejemplo, los agroecosistemas complejos) también podrían permitir una extensión de este límite (Ericksen et al., 2009). Aunque los efectos del cambio de los sistemas terrestres actúan como una variable lenta que influye en otros límites, como la biodiversidad, el agua y el clima, también puede desencadenar cambios rápidos a escala continental cuando se traspasan los umbrales de la cubierta terrestre. Por ejemplo, la conversión de la selva tropical amazónica en sistemas de cultivo o pastoreo puede llegar a un nivel en el que una pequeña cantidad adicional de conversión haría que la cuenca se transformara irreversiblemente en una Sabana semiárida (Oyama & Nobre 2003, Foley et al., 2007). A escala mundial, si se pierden suficientes tierras de alta productividad por la degradación, la producción de biocombustibles o la urbanización, la producción de alimentos puede extenderse a tierras marginales con menores rendimientos y un mayor riesgo de degradación. Esto puede constituir un umbral en el que un pequeño incremento de la producción de alimentos adicionales desencadenaría un aumento acelerado de las tierras cultivadas.

El límite del sistema de tierras debería implementarse a múltiples escalas a través de una arquitectura global de tierras de grano fino (Turner, 2009) que (i) reserve las tierras más productivas para el uso agrícola, (ii) mantenga los bosques y otros ecosistemas de alto valor de conservación en su estado actual, y (iii) mantenga los suelos y ecosistemas ricos en carbono en su condición no perturbada o cuidadosamente manejada. En ese sentido, existe un gran debate sobre el reparto de la tierra y ahorro de la tierra. Mientras que el reparto de la tierra favorece la co-ocurrencia espacial y la integración de los objetivos de producción y conservación, los enfoques de ahorro de tierra favorecen la segregación espacial de la agricultura intensiva y las áreas naturales, asumiendo que una superficie más pequeña necesaria para la producción podría ser utilizada como parte de una estrategia para "ahorrar" tierra para la conservación de la naturaleza. Las estrategias de ahorro son más coherentes con la práctica de conservación 'clásica', que se centraba en reservar zonas naturales bien conservadas, mientras que las estrategias de reparto han ganado popularidad más recientemente bajo el supuesto de que la conservación es localmente compatible con la agricultura,

en particular dentro de los usos tradicionales localmente diversificados (Grau et al., 2013; Fischer et al., 2014; Kremen, 2015).

1.4 Cambio de Uso del Suelo y Sistema Agroalimentario

Las preocupaciones sobre el cambio en el uso del suelo surgieron en la agenda de investigación sobre el cambio ambiental global hace varias décadas con la comprensión de que los procesos de la superficie terrestre influyen en el clima. A mediados de la década de 1970, se reconoció que el cambio de la cubierta terrestre modifica el albedo de la superficie y, por lo tanto, los intercambios de energía entre la superficie y la atmósfera, que tienen un impacto en el clima regional (Otterman, 1974; Charney & Stone, 1975; Sagan & otros, 1979). Con el cambio de siglo, se identificó una gama mucho más amplia de impactos del cambio de uso del suelo sobre los bienes y servicios de los ecosistemas. Los impactos sobre la diversidad biótica en todo el mundo (Sala et al., 2000), la degradación del suelo (Trimble & Crosson, 2000) y la capacidad de los sistemas biológicos para satisfacer las necesidades humanas (MEA, 2005). Los cambios de uso del suelo también determinan, en parte, la vulnerabilidad de los lugares y las personas a las perturbaciones climáticas, económicas o sociopolíticas (Kasperson et al., 1995; Turner et al., 2003; Kasperson et al. 2005). Cuando se agregan globalmente, los cambios de uso del suelo afectan de manera significativa los aspectos centrales del funcionamiento del sistema terrestre (DeFries et al., 2004; Cassman et al., 2005). No todos los impactos son negativos, aunque muchas formas de cambios en el uso del suelo están asociadas con continuos aumentos en la producción de alimentos y fibras, en la eficiencia del uso de los recursos y en la riqueza y el bienestar. El cambio contemporáneo de la cubierta terrestre se genera principalmente por la actividad humana, actividad dirigida a manipular la superficie de la Tierra para satisfacer alguna necesidad o deseo individual o social, como la agricultura (Turner et al., 1990; Cassman et al., 2005). El uso de la tierra ha sido definido como los propósitos para los cuales los humanos explotan la cubierta terrestre. Implica tanto la manera en que se manipulan los atributos biofísicos de la tierra como la intención que subyace a dicha manipulación, es decir, el propósito para el que se utiliza la tierra. Ejemplos que denotan intención o propósito son la silvicultura, los parques, el pastoreo de ganado, la urbanización y las tierras de cultivo (Lambin & Geist, 2006).

El cambio de uso del suelo aumentó notablemente en el siglo XX, tanto en términos de extensión como de intensidad. Entre 1950 y 1980 se talaron más bosques que a principios de los siglos XVIII y XIX juntos. Sin embargo, a finales del siglo XX también se produjo un cambio en la agricultura, que pasó de la expansión a la intensificación. Cada vez más, la producción mundial de alimentos proviene de la intensificación de la producción en las tierras de cultivo existentes, en lugar de la expansión de las tierras de cultivo en muchas partes del planeta, con excepción de ello en algunos países latinoamericanos. En *"Estado del Mundo 1996"*, Lester Brown se refirió a la "Aceleración de la Historia", donde observó que el uso de la energía mundial se ha acelerado dramáticamente en gran parte del mundo en los últimos 50 años. De hecho, entre 1961 y 2002, mientras que las superficies de cultivo aumentaron sólo un 15%, las superficies de riego se duplicaron, el consumo mundial de fertilizantes se multiplicó por 4.5 y el número de tractores utilizados en la agricultura se multiplicó por 2.4 (FAO, 2004). Además del aumento de la intensidad del uso de la tierra, el siglo XX es único en cuanto a la escala del uso de la tierra. Los cambios en el uso de la tierra, que a menudo se consideran un problema local, se han acumulado para convertirse en un problema mundial, a la par de otros problemas mundiales como el cambio climático y el agotamiento del ozono estratosférico.

De hecho, es muy probable que nuestro próximo gran problema de contaminación global esté relacionado con la contaminación por nitrógeno de las vías fluviales del mundo derivada de la aplicación excesiva de fertilizantes. El mundo tiene alrededor de 3.000 millones de hectáreas de tierras aptas para la producción de cultivos. De ellas, ya utilizamos 1.500 millones de hectáreas para alimentar al mundo, y un tercio de esta superficie se destina a la producción de piensos para el ganado (FAOSTAT, 2018). Por lo tanto, las magnitudes de los cambios en el uso de la tierra en el siglo XX están, a diferencia de cualquier otro momento de la historia, acelerando su intensidad y presencia en todo el mundo.

A lo largo de la historia y en la mayoría de las principales regiones del mundo, la expansión de las tierras agrícolas ha servido como una herramienta de redistribución de la población y también ha desempeñado un papel clave en la formación y consolidación de los estados nacionales (DeKoninck & Dery, 1997). En este último caso, el acceso a la tierra, la mano de obra, el capital, la tecnología y la información está estructurado (y frecuentemente limitado) por las políticas e instituciones locales y nacionales (Batterbury & Bebbington, 1999). Además, los temas cruciales de los derechos de propiedad se encuentran claramente en el ámbito institucional, y los administradores de la tierra tienen diversas capacidades para participar y definir estas instituciones (Lambin & Geist, 2006). El suministro y la disponibilidad de alimentos ha sido un factor crucial que ha determinado el surgimiento, el desarrollo y la pervivencia de las civilizaciones humanas a lo largo de los tiempos. Durante las últimas décadas, los alimentos han sido más baratos en términos reales y más fácilmente disponibles que probablemente en cualquier otro momento de la historia, lo que explica en parte por qué la política alimentaria ha recibido menos importancia en la toma de decisiones nacionales e internacionales que en épocas anteriores. Sin embargo, no se puede decir que exista actualmente un sistema agroalimentario mundial que funcione cuando una de cada siete personas hoy en día todavía no tiene acceso a suficientes alimentos, y un número igual está sobrealimentado. Mirando hacia el futuro, se pueden identificar las amenazas conocidas para el sistema alimentario y los factores que aumentarán los riesgos de un aumento del hambre. El crecimiento de la población y del consumo hará que la demanda de alimentos aumente durante la mayor parte del siglo actual, mientras que la creciente competencia por la tierra, el agua y otros recursos amenazarán el suministro de alimentos. La amenaza del cambio global hace necesario que el sistema agroalimentario sea resiliente a las crisis que no pueden ser predichas (Godfray, 2010). En ese sentido, el concepto de agricultura climáticamente inteligente (CSA, por sus siglas en inglés) está adquiriendo una importancia considerable en los planos internacional y nacional para hacer frente a los desafíos de la planificación agrícola en el marco del cambio climático.

El CSA es un concepto que exige la integración de la necesidad de adaptación y la posibilidad de mitigación en las estrategias de crecimiento agrícola para apoyar la seguridad alimentaria. Varios países de todo el mundo han expresado su intención de adoptar el enfoque CSA para gestionar sus sectores agrícolas. Sin embargo, sigue existiendo una considerable confusión sobre lo que implican realmente el concepto y el enfoque del CSA, y una amplia variación en la forma de utilizar el término (Lipper & Zilberman, 2018; Ngoma et al., 2018). La mezcla de expansión de las tierras de cultivo y la intensificación agrícola ha variado geográficamente (Ramankutty et al., 2002). Mientras que Asia tropical aumentó su producción de alimentos principalmente mediante el incremento del uso de fertilizantes y el riego, la mayor parte de África y América Latina aumentaron su producción de alimentos mediante la intensificación y la extensión de la frontera agropecuaria (Lambin & Geist,

2006). Esta expansión agrícola tiene múltiples efectos de gran alcance en las opciones económicas disponibles para la mayoría de las personas de las regiones de países en desarrollo, en donde debido a que los pequeños agricultores no pueden ganarse la vida con cultivos alimentarios estables, recurren cada vez más a actividades distintas de la agricultura para ganarse la vida, y a la vez los grandes productores siguen expandiendo sus fronteras agrícolas (Stonich & DeWalt, 2019).

- **Panorama del Cambio de uso del suelo y el sistema agroalimentario en México**

La historia del sistema agroalimentario en México es muy interesante, antes de la conquista europea, los bosques coexistían con civilizaciones de alta densidad de población sin pérdida conocida de diversidad biológica (Gómez-Pompa, 1990). A partir del núcleo fundacional mesoamericano se desarrolla en el México prehispánico un formidable y complejo sistema agroalimentario, hasta donde se sabe muy eficiente en materia de alimentación, utilización y aprovechamiento de recursos naturales (Luiselli, 2018). Los cuatro principales sistemas agrícolas que se fueron adaptando a la variada ecología mesoamericana son: a) sistemas extensivos y b) sistemas de mediana intensidad, en los que dominaban las prácticas con roza-tumba-quema, c) sistemas intensivos, dependientes del temporal, el riego y la humedad, y d) sistemas especiales, constituidos por huertos frutales en solares domésticos, las milpas caseras, nopaleras y magueyales. Los mexicas y otros pueblos mesoamericanos tenían al maíz, el frijol y la calabaza en el centro de su alimentación; las chinanpas, terrazas, la irrigación y los cultivos entreverados lograban una sólida plataforma productiva de múltiples cultivos, todo sin uso de animales de tiro, maquinaria o agregados químicos no orgánicos. Pero cultivar la tierra también significó desmontar masivamente. Se rozaba el terreno y ahí mismo se quemaba el bosque, el suelo se agotaba pronto y había que dejarlo descansar y por ello mismo se abría más y más tierra para el cultivo. En otras palabras, también en el mundo mesoamericano se desmontó en exceso, selvas importantes fueron eliminadas para abrir paso al maíz y se agotaron considerables superficies de suelos (Luiselli, 2018).

El siglo XIX, es llamado por algunos como “Siglo de la Hacienda”, porque en él se registra la consolidación de las haciendas, ranchos y dentro de los pueblos o aledaños a los mismos, las unidades familiares campesinas indígenas de subsistencia, cada vez más diferenciadas entre sí. Lo que se conoce del siglo XIX en el orbe agrícola, es un vasto mosaico regional que va profundizando poco a poco sus diferencias con base en la vocación agroclimática de los cultivos. La estructura agraria no se modificó apreciablemente sino hasta el último tercio del siglo y el país continuó siendo rural. Las sequías, al igual que en los siglos anteriores, fueron frecuentes y devastadoras, afectando más a los cultivos de subsistencia, como el maíz y el frijol y al propio ganado. A partir de la rebelión de Tuxtepec en 1876 arranca el largo periodo de gobierno de Porfirio Díaz que termina con su renuncia y exilio en 1911. Durante su época la agricultura creció, se abrió al comercio exterior y generó cuantiosas divisas. El crecimiento de la producción se sustentó, sobre todo, en la expansión de los cultivos comerciales, expandiendo las tierras y mejorando las técnicas. El mercado interno de productos agropecuarios se expandió notablemente, siguiendo la urbanización y el crecimiento de la población, pero también se benefició de las mejoras en comunicaciones, especialmente del ferrocarril que permitió la existencia de un mercado nacional. En esta etapa se apreció una clara política de fomento agrícola, se crearon escuelas agrícolas, y se introdujeron nuevas técnicas de cultivo (rotación, variedad de semillas de mayor rendimiento, manejo de suelos y uso de fertilizantes) (Luiselli, 2018).

En materia agrícola, el siglo XX mexicano fue el siglo de la reforma agraria y de la modernización de la agricultura inducida, por un Estado activo e interventor que intenta un cambio de modelo centrado en los campesinos y por primera vez, con un enfoque integrador de aspectos productivos y de consumo alimentario: el Sistema Alimentario Mexicano (SAM). A finales del siglo XX, surgen semejanzas con los finales del siglo XIX: emerge un fuerte sector agroexportador, que explica en gran medida la dinámica del sector y se establece un patrón agrario "bimodal" altamente polarizado. Ya no hay grandes haciendas o latifundios, pero sí un proceso dramático de pulverización de la tenencia y un pequeño sector de productores medianos y grandes, con altos rendimientos. En el mundo, la agricultura también prospera de modo notable, más tarde durante el siglo XX se produce la llamada "Revolución Verde" que además de los agroquímicos y el riego, introduce variedades de semillas mejoradas que incrementan los rendimientos de los principales cereales. México no fue ajeno a estos cambios, el país hace grandes obras de riego y se coloca como uno de los líderes mundiales en materia de riego, y es en México donde nace la Revolución Verde, con trigos mexicanos mejorados en el Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y el Trigo (CIMMYT). Sin embargo, como todos los países en desarrollo, México innova poco y tarde, y los beneficios de todas las mutaciones tecnológicas tienen un impacto limitado y desigual, por lo que la productividad promedio de la agricultura sigue siendo baja incluso en lo que va del siglo XXI (Luiselli, 2018).

Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN)

Desde su creación a finales del siglo XX (1994), el TLCAN ha sido un punto de inflexión de la reforma de la política neoliberal en las Américas. El TLCAN de forma gradual comenzó a alterar el patrón de cultivos, perfilando cada vez más una especialización en términos del mercado ampliado de América del Norte, donde México perdió competitividad en granos y oleaginosas, y la fue ganando en productos hortofrutícolas (Luiselli, 2018). Hoy en día, la incertidumbre política gira en torno al tratado y al futuro del comercio binacional, al menos entre los Estados Unidos y México. Los efectos más perjudiciales del TLCAN en México han estado vinculados con la fuerte disminución de la agricultura tradicional y el aumento de las enfermedades crónicas basadas en la dieta, asociadas con la producción y el consumo industrial de alimentos. Como menciona Galvés (2018) "La comida mexicana es en parte tan popular en este momento precisamente porque está quedando fuera del alcance de tantos mexicanos" Mientras tanto, los pequeños agricultores mexicanos se enfrentan a la sequía, la disminución de los rendimientos y el estancamiento de los precios de sus cosechas de maíz, si es que siguen cultivando. Desde el régimen dictatorial del Presidente Porfirio Díaz a finales del siglo XIX, el Estado mexicano en proceso de modernización ha considerado la agricultura campesina como un problema a resolver y no como parte integrante del sistema total de producción de alimentos del país. La autora traza cómo esta ideología ha llevado al punto en que "un impactante 42% del suministro de alimentos de México actualmente se importa de los Estados Unidos" (Galvés, 2018).

A pesar de la brutal importación de alimentos, en México entre 1993 y 2007 los bosques templados, los bosques secos tropicales y los matorrales fueron las coberturas naturales más afectadas en términos de extensión, mientras que los bosques tropicales siempre verdes y los pastizales naturales perdieron proporcionalmente más extensión en comparación con las otras coberturas naturales; la expansión agrícola ha sido la causa del 40 % - 80 % de esa pérdida de vegetación natural (dependiendo del ecosistema del que se hable) (Mendoza-Ponce et al., 2017). Por ello, un objetivo importante de la política de uso de suelo en el país ha sido, en las últimas tres

décadas, aumentar la seguridad alimentaria (Yúñez et al., 2013) y reducir las actividades que contribuyen al cambio global (por ejemplo, Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección del Medio Ambiente, 1988). Aun queda mucho debate respecto a la racionalidad y veracidad de subsidiar algunos de los principales sistemas de producción de alimentos y seguir afirmando que se protege con estos a los principales reservorios de biodiversidad (Muñoz-Piña et al., 2008; Schmoock y Vance, 2009; Sarukhán et al., 2015), sabiendo ampliamente que la expansión agropecuaria en las últimas cuatro décadas ha impactado negativamente en grandes magnitudes a las regiones altamente biodiversas de México (Velázquez et al., 2003; Mas et al., 2004; Bonilla-Moheno et al., 2013; Moreno- Sánchez et al., 2014). Hoy, pasado el segundo decenio del siglo XXI, la agricultura mexicana, tras una mitación agraria importante y más de veinte años de reformas y de políticas públicas más técnicas y focalizadas, con el TLCAN (y otros instrumentos análogos), la equidad y el crecimiento siguen eludiendo al campo mexicano. La pobreza extrema sigue ahí, según la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición del 2012, una cuarta parte de los mexicanos tiene acceso deficiente a la alimentación, uno de cada tres mexicanos indígenas padece problemas de inseguridad alimentaria o de hambre, y el 20 % de la población tiene ingresos menores a la capacidad de adquirir una canasta básica de alimentos (Luiselli, 2018).

El reciente Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC) que reemplaza al conocido TLCAN, fue modificado, firmado y ratificado a inicios del 2020 y puesto en vigor en julio del mismo año; con este se espera impulsar el comercio para que sea beneficioso para todas las partes y posibilite mayor libertad en los mercados, un comercio más justo y un sólido crecimiento económico en América del Norte. En materia agropecuaria, el T-MEC mantiene el tratamiento de libre arancel para los productos agroalimentarios originarios de la región; es decir contempla el no pago de impuestos a la importación de estos productos en el comercio entre México y EEUU y México y Canadá (excepto para los productos del sector avícola y lácteos). Dentro de este la principal modificación reposa sobre dos supuestos: 1) la reafirmación del compromiso de eliminar subsidios a exportaciones agrícolas; 2) la determinación de áreas de colaboración y consultas en temas tales como competencia a las exportaciones, apoyos internos, y otras medidas relacionadas con el comercio agrícola. Según analistas, la principal diferencia entre el T-MEX y el TLCAN es que con el TLCAN el sector primario o agrícola, es decir el campo mexicano, quedaba como el sector “subordinado” o sobre quien recaían los embates de las consecuencias del tratado. En el nuevo tratado (T-MEC), es el sector empresarial quien recibirá los impactos por los cambios en el mundo laboral y las latentes fluctuaciones comerciales. Adicional a ello, se menciona el fortalecimiento del comercio digital a partir de tres objetivos:

- Fortalecer e impulsar el desarrollo del comercio digital mediante un esquema legal que fomente las operaciones electrónicas y, al mismo tiempo, brinde seguridad para los usuarios de los medios electrónicos.
- Promover un entorno digital que favorezca operaciones por medios electrónicos seguros.
- Generar e impulsar la innovación de contenidos, productos y servicios digitales de alta calidad, lo cual permitirá transformar la forma en cómo interactúan las personas y empresas.

De esto último se derivan diversas preguntas para México, especialmente porque el uso de sistemas digitales en las regiones productivas es bajo y en algunos casos nulo. La educación y las redes tecnológicas en zonas rurales aun siguen siendo primitivas en el país, por lo que este apartado

innovador refleja con claridad desigualdad de condiciones iniciales para el aprovechamiento del tratado.

1.5 Avances en la Conceptualización de la Seguridad Alimentaria

Derivado del actual debate acerca de los vínculos entre el cambio global y los sistemas agroalimentarios, la seguridad alimentaria adquiere gran relevancia para la orientación de esfuerzos como metas gubernamentales globales, como por ejemplo los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) construidos y firmados en 2015 por diferentes países de cara a la Agenda de Desarrollo Sostenible 2030 (Assembly, 2015). Los ODS son el resultado de cambios sociales y económicos que se han venido realizando en el mundo en los últimos años (FAO, 2017) y que plantean y representan el reto de una articulación y transformación a nivel planetario. La seguridad alimentaria ha sido contemplada directamente dentro de los 17 ODS en el Objetivo 2 *“Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible”* (Assembly, 2015); como parte de las metas de dicho objetivo, se contempla la erradicación del hambre, poner fin a las formas de malnutrición, mejorar la productividad agrícola e ingresos de pequeños productores, asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos y aplicar prácticas agrícolas resilientes, entre otros. Sin embargo, la seguridad alimentaria es incluida de forma indirecta en los objetivos 3 *“Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades”* y el 6 *“Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”*. El tercer ODS apunta a atender los factores determinantes de malnutrición y salud, así como garantizar el acceso universal a los servicios de salud de calidad, eficaces, asequibles y seguros; mientras que el sexto ODS se enfoca en lograr el acceso universal y equitativo al agua potable, servicios de saneamiento e higiene a un precio asequible para todos (FAO, 2017).

La seguridad alimentaria ha venido evolucionando a lo largo del tiempo, en función del enfoque y la escala de análisis. Este concepto retoma sus orígenes en los años 30s dentro del contexto netamente médico, y como resultado del boom de estudiosos de la dieta en Estados Unidos, tras el descubrimiento de la insulina como terapia para el manejo de la diabetes (Sumner, 2016). Lo anterior se vio reflejado en el primer reporte de nutrición y salud pública en 1935. En 1943, derivado de la conferencia de Hot Springs of Food and agriculture, se desarrolló como un concepto orientado al *“suministro seguro y adecuado de alimentos para todos”* (Napoli et al., 2011). En 1945, después de la segunda guerra mundial, el término de seguridad alimentaria escaló a nivel de paradigma de política pública mundial, dando como resultado la creación de la FAO bajo la premisa de elevar los niveles de nutrición y vida, mejorar la productividad agrícola y la condición de la población rural, organismo que antecediendo la declaración de Naciones Unidas posicionó el acceso a la alimentación como derecho humano fundamental (Sassi, 2018). En 1974 en la cumbre mundial de la alimentación, la seguridad alimentaria se conceptualizó como *la “disponibilidad en todo momento de suministro de alimentos básicos para mantener una expansión constante del consumo de alimentos y compensar las fluctuaciones en la producción y los precios”* (UN, 1975), definición que enfatizó en el volumen y la estabilidad en el suministro de alimentos. En 1983, el concepto fue modificado por la FAO con la incorporación de la vulnerabilidad de las personas en torno a los suministros disponibles, en un balance entre la demanda y suministro, siendo entonces la seguridad alimentaria: *“Asegurar que todas las personas en todo momento tengan acceso físico y económico a los alimentos básicos necesarios”* (FAO, 1983). Tres años después, después de la publicación del

informe de Pobreza y hambre por parte de Banco Mundial, la definición se orientó en la dinámica temporal de seguridad alimentaria y su relación con los problemas de pobreza estructural, bajos ingresos y la inseguridad alimentaria crónica, la cual se asocia a desastres naturales, crisis económicas y conflictos bélicos. De esta discusión, se reformuló el concepto al *“Acceso de todas las personas en todo momento a alimento suficiente para una vida activa y saludable”* (World Bank, 1986).

A mediados de los años 90s, el concepto escalo a reconocer no sólo la relación de suficientes alimentos versus los problemas de desnutrición proteico-energética, enfatizando en el equilibrio nutricional, dando visibilidad a la composición de los alimentos y el establecimiento de umbrales de requerimientos mínimos para una vida sana y activa (Clay, 2002). En 1996, como resultado del consenso de la Cumbre Mundial de la Alimentación de Naciones Unidas, la definición se complejizó al hacer explícita las escalas de análisis dentro del concepto, definiendo Seguridad Alimentaria como *“a nivel individuo, hogar, regional, nacional y global, la seguridad alimentaria se consigue cuando todas las personas en todo momento tienen acceso físico y económico a suficiente alimento seguro y nutritivo, para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias, con el objeto de llevar una vida activa y sana”* (FAO, 1996). Esta última fue reformulada en el 2001 por la FAO, como *“la seguridad alimentaria es una situación que existe cuando todas las personas, en todo momento, tienen acceso físico, social y económico a alimentos suficiente, seguro y nutritivo que permite llevar sus necesidades dietarias y preferencias para una vida activa y saludable”* (FAO, 2002), es hasta la fecha la más ampliamente usada en documentos científicos (Ericksen, 2008a, Ericksen, 2008b; Lang, T., & Barling, 2012; De Laurentiis et al., 2016) y es el concepto que será tomado en cuenta en la presente investigación. Es importante señalar que la contraparte de seguridad alimentaria es la inseguridad alimentaria, y que este concepto ha estado relacionado únicamente con el hambre (Napoli et al., 2011).

Con la inclusión de los diferentes niveles de análisis en el término de seguridad alimentaria, se diversificó el concepto según la escala (Pinstrup-Andersen, 2009). Tradicionalmente el concepto ha sido empleado principalmente a nivel global y nacional, dando énfasis en los suministros de alimentos, a partir de la identificación de la producción y los requerimientos dietarios a nivel país, por lo que el término *“autosuficiencia alimentaria”* ha sido usado como sinónimo para medir a través del tiempo la seguridad alimentaria. En otras palabras, si a nivel planetario o país se produce el suficiente alimento para cubrir las necesidades de su población (Pinstrup-Andersen, 2009), se asume que existe seguridad alimentaria. Esto involucra dos aspectos: el uso de recursos y el impacto ambiental relacionado con la producción de alimento, y el estado nutricional de la población mundial (Ibarrola-Rivas & Galicia, 2017). Además de la postura de análisis mencionada y bajo la observación de que existen comunidades en las que a pesar de existir un suministro adecuado de alimentos, presentan una ingesta inadecuada de alimentos, se han desarrollado toda una serie de investigaciones a nivel comunitario, local, familiar e incluso individual (Leathers & Foster, 2004). El concepto a estos niveles, generalmente se traduce en términos de una medición de bienestar dada la funcionalidad en la operacionalización de políticas públicas (diseño, implementación y evaluación) (Sassi, 2018).

Derivado de los trabajos de FAO (2002) y Ericksen (2008a), el concepto de seguridad alimentaria se dividió operativamente en 3 componentes o dimensiones que se deben garantizar simultáneamente para obtener el cumplimiento pleno de Seguridad Alimentaria como una condición. Las 3

dimensiones son: a) Disponibilidad de alimentos (Food availability), la cual se encuentra constituida por la producción, distribución e intercambio de alimentos; b) Acceso a los alimentos (Food Access), que depende de la asequibilidad, asignación y preferencia de los alimentos; y c) La utilización de los alimentos (food utilization), que integra el valor nutricional y valor social. Aunado a los anteriores componentes, algunos autores incorporan la dimensión temporal, así como los patrones de estabilidad alimentaria (Food stability; Leathers & Foster, 2004) y la necesidad de además de satisfacer las tres dimensiones o componentes en el tiempo presente, también garantizarlas para las poblaciones futuras (Ibarrola-Rivas & Galicia, 2017).

La **disponibilidad de alimentos** se define como la cantidad, tipo y calidad de alimentos que un individuo tiene a su disposición para consumir. La disponibilidad depende de la distribución de los canales de comercialización y está en función de los mecanismos de intercambio monetaria o laboral (Ericksen, 2012). Algunos autores han empleado este concepto como una medición de la autosuficiencia alimentaria, es decir, se asume que hay disponibilidad si un país o región produce el suficiente alimento para cubrir las necesidades de su población (Pinstrup-Andersen, 2009); mientras que otros autores plantean que el concepto debe integrar el resultado de la producción interna y el producto de los intercambios comerciales en forma de importaciones o bien por donaciones (WFP, 2009).

El **acceso a la alimentación** es la capacidad de acceder al tipo, calidad y cantidad de alimentos requerido, y se puede analizar en función de la asequibilidad de los alimentos disponibles, así como por la eficacia de los mecanismos de asignación de mercados y políticas gubernamentales, aunado al hecho de que los consumidores puedan satisfacer sus preferencias alimenticias culturales (Ericksen, 2012). El acceso puede delimitarse en función de los ingresos del trabajo, producción de subsistencia-autoconsumo o mediante el apoyo de políticas públicas como programas de transferencias condicionadas, asistencia alimentaria y alimentación escolar (FAO, 2017). Es importante mencionar que existe un debate abierto en torno a incluir las preferencias alimenticias en un marco de globalización y los procesos urbanización, porque estos pueden incidir en las preferencias de la población (Ibarrola-Rivas & Galicia, 2017).

La **utilización de los alimentos** hace referencia al uso biológico adecuado de los alimentos, que depende tanto de una dieta que proporcione valores nutricionales y sociales de los alimentos, como de adecuados servicios de salud (Ericksen, 2012). Además de la inocuidad de los alimentos, también se ha planteado que la utilización debe integrar las facilidades sociales para conseguir de forma efectiva que la población aproveche los nutrientes contenidos en los alimentos, lo cual se encuentra en relación absoluta con el estado de salud de los individuos (Sen, 2000). Este debate promovió la formulación del concepto de seguridad nutricional a partir de 2015 (FAO, 2015), como una dimensión que da cuenta de la disposición del acceso seguro a una dieta suficientemente nutritiva, combinado con un entorno salubre y servicios sanitarios y de atención de la salud adecuados. La seguridad nutricional difiere de la seguridad alimentaria en el sentido de que considera los aspectos relativos a prácticas de atención adecuadas, la salud y la higiene además de la suficiencia de la dieta (FAO, 2017).

La **estabilidad de los alimentos** se relaciona con el aseguramiento al acceso de los alimentos de forma periódica, porque la falta de acceso representa un riesgo para la condición nutricional. La estabilidad reconoce la incidencia de condiciones climática adversas, la inestabilidad política y los

factores económicos (e.g. el desempleo, aumento en el precio de los alimentos) (FAO, 2015). Se da cuando la seguridad alimentaria permanece constante durante el año y a largo plazo, se minimizan los riesgos externos, como los desastres naturales y el cambio climático, la volatilidad de los precios, los conflictos o las epidemias a través de la resiliencia, adaptación y prevención del cambio climático y el desarrollo de sistemas alimentarios sostenibles. Además, debe contemplar la estabilidad política y económica para proporcionar alimentos de calidad y accesibles que garanticen la seguridad alimentaria y la nutrición de las personas (Klennert, 2009; FAO, 2017).

En los últimos 50 años, el mundo ha experimentado un crecimiento sostenido del comercio, incluido el de productos alimenticios. La globalización del sistema alimentario se ha producido debido a transportes y comunicaciones más baratas, pero también a la reducción de las barreras comerciales y los aranceles agrícolas. Los países desarrollados siguen subvencionando sus sectores agrícolas, aunque a ritmos que han disminuido considerablemente desde el máximo alcanzado a mediados de los años ochenta. Históricamente, los países en desarrollo han explotado en lugar de subvencionar su sector agrícola, y a pesar de que los impuestos y otras cargas sobre la agricultura están disminuyendo, las estimaciones recientes sugieren un subsidio neto en el mundo en desarrollo con tasas todavía muy inferiores a las de los países ricos. Otro componente importante de la globalización es la liberalización de las normas que rigen la inversión extranjera directa, una tendencia que está promoviendo la consolidación del sector privado (venta al por menor, procesamiento y agroindustria) en muchos menos actores globales (Anderson, 2010).

Un punto de inflexión en el abordaje de seguridad alimentaria se encuentra relacionado con la crisis financiera del 2008 o gran recesión, resultante del impacto directo del colapso inmobiliario en Estados Unidos en 2006 que derivó en una crisis alimentaria derivada del alza de los precios de los alimentos a nivel mundial (Lang & Barling, 2012). Esta subida de precios se originó por la convergencia de tres factores principales (French et al., 2009):

- a) La creciente producción de maíz en Estados Unidos para la elaboración de biocombustibles para el consumo humano, afectando la oferta destinada a la producción de alimentos sobre todo en países que importaban el maíz de dicho país.
- b) La reorientación de la producción cerealera de consumo animal para aumentar la producción industrial de carnes, buena parte asociada al incremento de demanda de países asiáticos (China e India), resultante de cambios culturales en torno al estilo de vida y hábitos alimenticios.
- c) Los procesos de cambio de la biodiversidad derivados de sistemas agropecuarios industrializados y el stress hídrico asociado a la irrigación de estos sistemas.

Estos factores modificaron los patrones del paradigma productivista o de fomento productivo con énfasis en suministros para atender los problemas de seguridad alimentaria, a un enfoque de sistemas alimentarios asociados a las siguientes cuestiones (Lang et al., 2009; Popkin, 2009; Nellesmann, 2009; Lawrence et al., 2013; Burch & Lawrence, 2007; Schwartz, 2004): a) Políticas gubernamentales construidas desde abajo; b) Focalización de ejes de acción en la transición nutricional en vez de la demanda alimentaria, en particular en países en vías de desarrollo; c) Consideración de los impactos ambientales en la producción, distribución y consumo de alimentos; d) Cambio en los patrones dietarios; e) Cambios entre las relaciones de poder y control sobre los sistemas agroalimentarios entre los intereses gubernamentales y económicos; f) Nuevas formas de gobernanza por parte de los pequeños productores en torno a la cadena de valor; g) Cambio en la

cultura alimentaria tradicionalmente reglamentaria a un consumidor impulsado por la elección (Lang & Barling, 2012). Dichas consideraciones propician una serie de tensiones entre los viejos y nuevos paradigmas que orientan los análisis y debate en torno a seguridad alimentaria (Figura 3).

Como presagian las reacciones al aumento de los precios de los productos básicos en 2008, es probable que la política alimentaria adquiera mayor importancia en las próximas décadas. La oleada de restricciones comerciales provocada por el aumento de los precios de los alimentos en 2008 y la imposibilidad de llegar a un acuerdo comercial multilateral ese año demostró que la creciente liberalización del comercio no es una conclusión previsible y, de hecho, un posible escenario futuro es que los países en desarrollo, a medida que se enriquecen, impongan sus propios subsidios y restricciones comerciales. Existen modelos económicos que sugieren que esto perjudicará a los países más pobres y aumentará la volatilidad (Anderson, 2010). Otros factores que pueden influir en los mercados alimentarios mundiales son la evolución de la estructura del sector privado y las incertidumbres asociadas a la competencia por la energía (especialmente a través de los precios del petróleo y la demanda de biocombustibles), el agua y los efectos del cambio climático. Las repercusiones de la volatilidad en los países varían en función de si son exportadores o importadores netos de alimentos. En el caso de un hogar, cuanto mayor es la proporción de los ingresos que se gasta en alimentos, mayores son las repercusiones negativas de los aumentos de los precios de los alimentos, como se puso de manifiesto en los disturbios por alimentos que se produjeron en varios países de bajos ingresos en 2008 (Godfray, 2010).

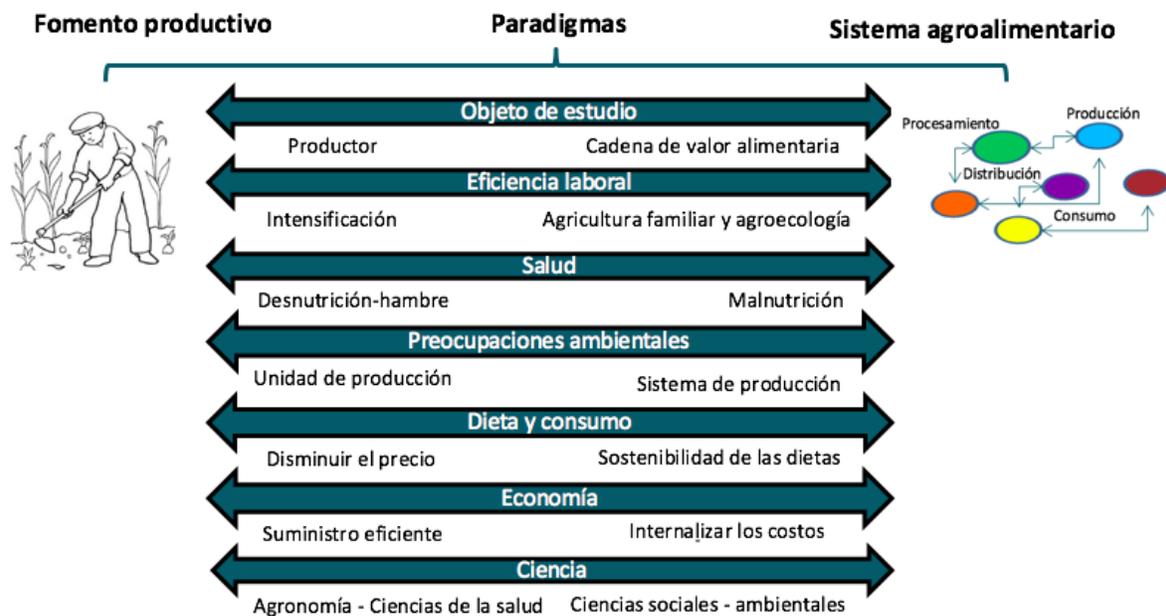


Figura 3. Tensión entre el viejo paradigma versus el nuevo paradigma derivada de la crisis financiera del 2008. Elaboración propia.

Capítulo 2

Marco de Referencia

2.1 Medición de la Seguridad Alimentaria: Índices Globales y Nacionales

A partir de la evolución del concepto de seguridad alimentaria y la diversidad de conceptos dada la aplicación en política pública, academia y el énfasis en alguna de sus dimensiones, se han generado diferentes formas de medir y evaluar la seguridad alimentaria. Los análisis están en función del propósito de investigación/aplicación, por ello existen enfoques de revisión de causas o efectos de la inseguridad alimentaria (e.g. a partir de la medición del hambre), de estimaciones reales o potencial a partir del empleo de variables cualitativas o cuantitativas; y una diversidad de unidades de análisis (e.g. macro o nacional, meso o regional y micro o familiar) (Masset, 2011). El uso de índices como magnitudes o expresiones numéricas para ilustrar la relación entre dos o más indicadores asociados a un fenómeno permite objetivar los fenómenos, desmitificándolos y ofreciendo herramientas para el monitoreo de tendencias, e implica un alto nivel de abstracción del fenómeno a estudiar (Márquez, 2006). Éste se refiere a categorías complejas que apuntan a fenómenos multidimensionales que van más allá de conductas concretas y que incluyen de manera central valoraciones subjetivas específicas susceptibles de diversas interpretaciones (Núñez del Prado, 1994). Los índices se estructuran a partir de la previa disposición de datos secundarios respecto de los cuales se realizan unas determinadas operaciones. Los datos secundarios son aquellos que han sido generados de manera independiente y con objetivos diferentes a los de la investigación en curso (Márquez, 2006). Las elaboraciones de índices sintéticos reordenan y resignifican los datos secundarios en función de un marco teórico y metodológico nuevo, que obedece al fenómeno que se pretende describir o analizar con objetivos específicos que son distintos de los objetivos usados para la producción o levantamiento de los datos primarios (World Bank, 2004). Dentro de las desventajas asociadas a la elaboración de índices, se menciona el hecho de sobre-simplificar los fenómenos reduciéndolos sólo a sus mediciones (e.g. la pobreza), además de la subjetividad del investigador/institución en la reducción de la multidimensionalidad de un fenómeno a aquellas dimensiones de interés para el investigador (Márquez, 2006; Núñez del Prado, 1994).

Se han realizado diversos esfuerzos globales para construir un índice orientado a la medición anual por país, por ejemplo, en 1987 la FAO creó el índice de deficiencia alimentaria y energética que busca medir el hambre como una proporción de la población con el consumo energético individual bajo ciertos estándares de requerimientos nutricionales. Para su medición se emplean tres parámetros: a) La disponibilidad per cápita de alimento, b) la desigualdad en el consumo de energía, y c) los requerimientos energéticos a nivel país dependiendo del sexo y los grupos de edad (Neiken, 2002). Este índice que se encontraba asociado principalmente a la disponibilidad y acceso físico, evolucionó a partir de la reunión de expertos sobre medición del hambre en el marco del Comité de Seguridad Alimentaria Mundial en 2011, en la que se construyeron 26 indicadores de cada dimensión de Seguridad Alimentaria (FAO, 2012):

- a) **Disponibilidad:** a partir del suministro de energía alimentaria promedio, el valor de la producción de alimentos, la proporción del suministro de energía alimentaria derivado de cereales, raíces y tubérculos, el suministro de proteínas promedio y las proteínas de origen animal.
- b) **Acceso:** mediante la densidad de líneas ferroviarias, el producto interno bruto per cápita, la prevalencia de subalimentación, la prevalencia de inseguridad alimentaria moderada o grave en la población.
- c) **Estabilidad:** en función de la proporción de dependencia de las importaciones de cereales, el porcentaje de tierra arable provista de sistemas de riego, el valor de las importaciones de alimentos en el total de las mercancías exportadas, la estabilidad política y ausencia de violencia o terrorismo, la variabilidad de la producción de alimentos per cápita y la variabilidad del suministro de alimentos per cápita.
- d) **Utilización:** a través del porcentaje de la población que utiliza servicios de agua potable gestionados de manera segura, el porcentaje de la población que utiliza por lo menos servicios básicos de agua potable, el porcentaje de la población que utiliza servicios de saneamiento gestionados de manera segura, el porcentaje de la población que utiliza por lo menos servicios básicos, el porcentaje de niños menores de cinco años que padecen emaciación, el porcentaje de niños menores de cinco años que padecen retraso del crecimiento, la prevalencia del sobrepeso entre los niños menores de cinco años, la prevalencia de la obesidad entre la población adulta, la prevalencia de la anemia entre las mujeres en edad fértil, la prevalencia de la lactancia materna exclusiva entre los niños de hasta cinco meses de edad y la prevalencia de bajo peso al nacer.

Dentro de las iniciativas a nivel planetario, también se conoce un índice denominado Global Hunger Index, que fue diseñado por The International Food Policy Research (IFPRI); este índice tiene énfasis en el acceso físico y el acceso a un status nutricional, está orientado a medir hambre a partir de tres indicadores con el mismo peso: desnutrición, talla en los niños y mortalidad infantil, a través de los cuales los diferentes países son ordenados sobre una escala de 100 puntos y el hambre es categorizada como baja hasta extremadamente alarmante (<https://www.globalhungerindex.org/>). Otro índice global fue desarrollado por The Economist Intelligence Unit y se denomina Global Food Security Index (GSFI), se caracteriza por ser un índice multidimensional orientado a medir el acceso físico y económico, además de la calidad, cantidad e inocuidad de los alimentos, y emplea alrededor de 30 indicadores que son ponderados subjetivamente por un panel de expertos y analistas

(<https://foodsecurityindex.eiu.com/>). Adicional a los índices anteriormente mencionados, otro grupo de índices han estado orientados a modelos predictivos para monitorear la seguridad alimentaria en áreas de alto riesgo de inseguridad alimentaria severa. The Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) es una red internacional de asociaciones fundada por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) que produce estadísticas de seguridad alimentaria mensuales de 25 países, predominantemente africanos, centroamericanos y de medio oriente. Esta red integra imágenes de satélite para monitorear la dinámica de lluvias, el índice de vegetación normalizado (NDVI), temperatura, además de estadísticas en torno a la producción agrícola, precios, comercio, inestabilidad política y medios de vida locales. Con el fin de alinearse con estándares globales para la clasificación de seguridad alimentaria, FEWS NET modificó su sistema de clasificación al sistema the Integrated Food Security Phase Classification (IPC) en abril de 2011 (<https://fews.net/>).

El IPC representa una serie de protocolos para evaluar la situación de la Seguridad Alimentaria dentro de una región dada, tiene como objetivo establecer una clasificación dada la magnitud de inseguridad alimentaria en contextos específicos. La fuente de datos recae en los censos de población y encuestas de salud en relación a un indicador múltiple a nivel hogar, consultas gubernamentales y organizaciones de la sociedad civil. Las categorías de inseguridad alimentaria identificadas en el IPC van desde mínima, crisis, emergencia y hambruna y abarcan niveles desde localidades hasta provincias. Al igual que el índice GSFI, el sistema de clasificación IPC se basa en la interpretación subjetiva de expertos en torno al consumo, cambios en los medios de vida, nutrición y salud, así como aspectos asociados a vulnerabilidad y peligros naturales en 38 países en extrema pobreza (<https://fews.net/sectores-t%C3%B3picos/abordagem/classifica%C3%A7%C3%A3o-integrada-de-fases>). Los índices a nivel hogar predominante se ha realizado a partir del acceso a los alimentos, mientras que los esfuerzos globales y nacionales anteriormente mencionados han puesto énfasis en la disponibilidad de alimento (suministros) de países, sin considerar las dinámicas y determinantes en torno al acceso a los alimentos. A diferencia de las métricas nacionales, la seguridad alimentaria a nivel hogar y entre hogares basadas en datos de encuestas capturan con mayor precisión el comportamiento del acceso que no captan los datos agregados a nivel nacional y globales (Jones et al., 2013). Un ejemplo de medición de seguridad alimentaria a nivel hogar son las encuestas de gastos y consumos, que representan instrumentos para medir pobreza, evaluar índices de precios del consumidor y condiciones socioeconómicas de los hogares o viviendas; también son empleadas para examinar los patrones de consumo y gasto en alimentos (Fiedler et al., 2012), y la diversidad dietética de los hogares bajo el supuesto que la esta diversidad expresa las asociaciones con la calidad de los nutrientes de las dietas (Steyn et al., 2006) y la antropometría infantil (Ruel, 2003).

- **Medición de la Seguridad Alimentaria en México**

Una primera aproximación al abordaje de seguridad alimentaria en México se remonta a la creación del Sistema Alimentario Mexicano (SAM) en 1980, que fungió como un intermediario entre las políticas públicas y la población rural, y estableció las bases de una concepción sistémica e integral de la relación de la producción y el consumo alimentario de maíz, frijol y otros cultivos centrales en la producción campesina de la dieta mexicana (Luiselli, 2017; Lustig & Pérez, 1982). El abordaje del SAM se segmentó en dos estrategias generales, la primera orientada al consumo y la alimentación, y la segunda a la producción; impulsadas por una política nutricional enfocada a personas y

productores que presentaban serias deficiencias nutricionales, y orientada a la construcción de una canasta básica de consumo real de los alimentos y la conceptualización de una canasta ideal balanceada recomendable, ambas bajo una pauta de promoción e impulso de producción, distribución y consumo local (Luiselli, 2017; Lustig & Pérez, 1982). Dicha política propició la creación de empresas como Nutrimex para producir suplementos nutricionales y unificar la banca rural a través de Banco Nacional de Crédito Rural (Luiselli, 2017; Lustig & Pérez, 1982), que fue cerrado en 1982 con la entrada del presidente entrante Miguel de la Madrid y una insostenibilidad asociada a la caída de los precios de petróleo (Spalding, 1985).

En 1984 se creó la **Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH)**, un instrumento de captación de información desarrollado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para proporcionar información del comportamiento de los ingresos y gastos en los hogares, así como una descripción básica de las condiciones socioeconómicas y de vivienda de los hogares. Dicho instrumento ha sufrido una serie de transformaciones desde su origen a través de adiciones temáticas, mejoras metodológicas e innovaciones en los procesos, a partir de recomendaciones internacionales y de los requerimientos de información del estado. Desde 1992, la ENIGH se incorporó como un insumo para la medición de pobreza. A partir del 2008, con la publicación de la Ley General de Desarrollo Social, dicho instrumento en sinergia con el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), establecieron los lineamientos y criterios para la definición, identificación y medición de la pobreza, mediante la cual se efectuó la planeación, prueba y consolidación del Módulo de Condiciones Socioeconómicas de la ENIGH (MCS-ENIGH), que tuvo su primer levantamiento en 2008. Los ocho indicadores que fueron considerados son: Ingreso per cápita, Rezago educativo, Acceso a servicios de salud, Acceso a seguridad social, Calidad y espacios en la vivienda, Servicios básicos en la vivienda, Acceso a la alimentación y Grado de cohesión social. En términos del acceso a la alimentación, al no existir en el marco normativo mexicano criterios para definir los componentes del derecho a la alimentación, el CONEVAL recurrió a tratados internacionales ratificados por el estado, a partir de los cuales precisó dos elementos constitutivos del derecho a la alimentación: el derecho a no padecer hambre y el derecho a tener acceso a una alimentación sana y nutritiva. Para contar con una medición al respecto, el CONEVAL recurrió al concepto de seguridad alimentaria propuesto por la FAO en 2006 y decidió emplear una escala de seguridad alimentaria que reconoce cuatro posibles niveles de inseguridad alimentaria: severa, moderada, leve y seguridad alimentaria. Es importante mencionar que esta escala, considera en situación de carencia por acceso a la alimentación a los hogares que presentan un grado de inseguridad alimentaria moderado o severo. El grado está determinado en función del número de preguntas respondidas en el cuestionario como afirmativamente; en los hogares donde sólo residen adultos, se valora si en los últimos tres meses por falta de dinero o recursos algún integrante del hogar:

- a) Tuvo una alimentación basada en muy poca variedad de alimentos.
- b) Dejó de desayunar, comer o cenar.
- c) Comió menos de lo que piensa debía comer.
- d) Se quedó sin comida
- e) Sintió hambre, pero no comió.
- f) Comió una vez al día o dejó de comer todo un día.

Mientras que en los hogares donde viven menores de dieciocho años se considera una lista de otras seis preguntas similares a las descritas anteriormente, las cuales se aplican a este grupo de población. Algunas críticas a dicho instrumento se han realizado en términos de la ambigüedad de los entrevistados, como, por ejemplo, no resulta claro que todos los informantes tengan una idea precisa de lo que es una alimentación sana y variada o sobre lo que es “comer menos de lo que debía”. Aunado a la veracidad de las respuestas y de acuerdo a la impresión de entrevistadores, existe vergüenza en las personas de expresar que padecen hambre o que viven situaciones de insuficiencia alimentaria.

A partir del 2006 se realiza la **Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT)** por el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) como resultado de la evolución del Sistema Nacional de Encuestas de Salud, creado en 1986 para realizar la primera Encuesta Nacional de referencia imprescindible para la salud pública en México. Uno de los principales cambios que sufrió el planteamiento original ocurrió en el año 2000, con la modificación de la Encuesta Nacional de Salud en la que se incorporaron encuestas temáticas sobre enfermedades infecciosas, enfermedades crónicas, nutrición, adicciones, cobertura de vacunación y utilización de los servicios de salud, entre otras. En 2006, la ENSANUT fue modificada para incrementar la eficiencia en la generación de evidencia, así como el panorama sobre las condiciones de salud y nutrición de la población, en ella se consolidó su rol en generar información para incidencia en políticas públicas en materia de salud y desarrollo social (Abúndez et al., 2006; Romero-Martínez et al., 2013). Las modificaciones se basaron en recomendaciones realizadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para desnutrición y anemia, y por la International Obesity Task Force para combatir el sobrepeso y la obesidad (Abúndez et al., 2006). Entre 2011 y 2012, se aplicó nuevamente la ENSANUT para cuantificar la frecuencia, distribución y tendencias de las condiciones de salud y nutrición de la población y sus determinantes, así como examinar la respuesta social organizada a los problemas de salud y nutrición, incluida la cobertura y calidad de los servicios en la materia y la cobertura específica de los programas prioritarios de prevención en salud en los ámbitos nacional, estatal, por zonas urbanas y rurales, y por estratos socioeconómicos (Gutiérrez et al., 2012). Cabe destacar que el indicador de seguridad alimentaria fue incluido por primera vez en la ENSANUT 2012, lo que propició tener un panorama para documentar la magnitud y distribución de la Inseguridad Alimentaria, y para caracterizar a los hogares que presentan mayor severidad (Mundo-Rosas et al., 2018).

El indicador de seguridad alimentaria se construyó de acuerdo a la percepción y las experiencias de los individuos, y se midió usando la versión adaptada para México de la Escala Latinoamericana y Caribeña de Seguridad Alimentaria (ELCSA). La ELCSA consta de 15 preguntas con opciones de respuesta “sí” o “no” dirigidas al jefe de familia o a la mujer encargada de preparar los alimentos en el hogar. El periodo de referencia para las preguntas son los tres meses previos a la aplicación de la escala. La escala clasifica a los hogares en cuatro categorías, dependiendo del número de respuestas positivas y si cuentan o no con integrantes menores de 18 años (Gutiérrez et al., 2012). Los hogares que se clasifican en la categoría de inseguridad alimentaria leve informan, en primera instancia, preocupación por el acceso a los alimentos, sacrificando la calidad de la dieta. Cuando los hogares se encuentran en inseguridad alimentaria moderada, además del sacrificio en calidad, refieren restricciones en la cantidad de alimentos consumidos. Los hogares en inseguridad alimentaria severa, además de las percepciones anteriores, relatan experiencias de hambre en adultos y finalmente en niños (Gutiérrez et al., 2012). En el año 2016, dado el acelerado incremento en el

número de niños, adolescentes y adultos, con sobrepeso y obesidad, y de enfermedades relacionadas con la nutrición, como diabetes, anemia e hipertensión en el país, se decidió realizar la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición de Medio Camino (ENSANUT-MC). La ENSANUT-MC consiste en una serie de preguntas sobre el estado de salud y nutrición, como consumo de alimentos y bebidas, comprensión del etiquetado de alimentos, enfermedades de larga duración, actividad física, vacunación, servicios de salud y programas sociales de ayuda alimentaria a los que se tiene acceso, entre otras. Además, recaba información sobre las características de las viviendas y de los bienes en el hogar para generar un indicador socioeconómico que sea comparable con otros hogares en todo el país (Shamah-Levy et al., 2017).

Recientemente la Secretaría de Salud, el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) y el INEGI, llevan a cabo el levantamiento de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) 2018 (<https://ensanut.insp.mx/encuestas/ensanut2018/index.php>), con el objeto de conocer:

- a) Condiciones de salud y nutrición.
- b) Prevalencias y distribución de enfermedades agudas y crónicas degenerativas.
- c) Sobre población con anemia o deficiencias de los micronutrientes.
- d) Sobre población con problemas de desnutrición y obesidad.
- e) Información sobre el desarrollo infantil temprano y las prácticas de alimentación infantil.

Con un énfasis en:

- a) Cobertura, calidad, accesibilidad y utilización de programas de salud y nutrición.
- b) Gastos personales y familiares para salud.
- c) Factores ambientales, socioeconómicos y culturales determinantes del proceso salud-enfermedad.

La **Encuesta Nacional de Abasto, Alimentación y Estado Nutricio en el Medio Rural (ENAAEN)** es una encuesta diseñada por el INSP y el CONEVAL, levantada por el INSP en 2008 sólo en 100 localidades (90 rurales y 10 urbanas) en 8 entidades federativas (Gómez, 2009). Esta encuesta recolectó información sobre las siguientes variables:

- a) A nivel localidad: el abasto de alimentos mediante un cuestionario de establecimientos para determinar las características que tienen los mismos y qué tipo de alimentos venden.
- b) A nivel hogar: los patrones de consumo, autoconsumo y gasto de alimentos, entre otros.

Cabe señalar que la muestra solamente representa a los hogares encuestados, por lo que no es posible extrapolar los resultados a otras poblaciones ni generalizarlos para los grupos que se analizan. A pesar de los esfuerzos gubernamentales para hacer frente a la seguridad alimentaria en México, no existen actualmente investigaciones en las cuales se haya propuesto un índice de seguridad alimentaria con el que se pueda desglosar espacialmente en unidades ecogeográficas coherentes, las distintas realidades regionales derivadas de la diversidad de contextos socioecológicos presentes a lo largo y ancho del país.

2.2 Estructura del Sistema Agrícola y Seguridad Alimentaria

La seguridad alimentaria es fuertemente dependiente de los sistemas agrícolas, esto hace explícita la relevancia de considerar la estructura agrícola en el entendimiento de las relaciones entre el

medio ambiente, la población, los recursos disponibles, la infraestructura e instituciones, y su estrecha conexión con la alimentación y la salud humana (Ericksen et al., 2009). La estructura del sistema agrícola es la forma en que están organizados e interactúan entre sí las unidades de producción dentro del sector agrícola en una determinada región, para llevar a cabo una serie de acciones entre las personas, y los recursos disponibles que tienen como meta dar satisfacción a nuestros fines como individuo (FAO, 2019; Spedding, 2012). Los componentes del sistema agroalimentario son: la producción, procesamiento, distribución y consumo (Whatmore, 1995), estos se encuentran predominantemente en espacios rurales caracterizados al menos por tres elementos: a) Existe una relación con el medio natural, ya sea a través del uso de los recursos y servicios ecosistémicos para la producción agropecuaria como por su aprovechamiento en otro tipo de actividades, como la recreación y la residencia; b) Tienen poca densidad de población que habita la zona, si bien enmarcada dentro de una gran variabilidad de situaciones, pero claramente diferenciada de la urbana; y c) Poseen redes territoriales que articulan los ámbitos dispersos y los centros poblados de diferente tamaño fuertemente integrados al medio rural (Castro & Reboratti, 2008; Flores, 2013). Se han llevado a cabo una serie de estudios sobre el papel de algunos de los componentes del sistema agroalimentario en la seguridad alimentaria, en los que destaca el tamaño de la unidad de producción, el destino de la producción y los canales de comercialización, el origen de los ingresos de las unidades productivas, la tecnificación agrícola, la diversidad del sistema de producción, el manejo del agua, la tenencia de la tierra, el nivel educativo, la accesibilidad e infraestructura carretera, entre otras posibles conductores de cambio (Figura 4) (FAO, 2018; Altieri et al., 2012; Koohafkan et al., 2012).

Por ejemplo, se reconoce que el tamaño de la unidad de producción tiene relación con la producción de alimentos, y son generalmente vinculados con la seguridad y soberanía alimentaria (Petrini et al., 2016); esto es de gran importancia bajo el supuesto que los pequeños productores son parte esencial de sistemas de producción para generar los suministros alimentarios de la población rural, local y regional (Samberg et al., 2016; Lowder et al., 2016). Además, las pequeñas unidades de producción son consideradas un complemento de la agricultura intensiva (Cabral et al., 2016) y un tema esencial para el establecimiento de prácticas sostenibles en comunidades rurales de países en vías de desarrollo (Toader & Roman, 2015). La relevancia de los pequeños productores reconocida recientemente se ilustra con la declaración de Naciones Unidas en 2014 quienes declararon dicho año como el año de la agricultura familiar o pequeña agricultura, lo que ha promovido debates abiertos en relación a la visibilidad de la agricultura familiar respecto a su papel para la erradicación del hambre y la pobreza, particularmente en las zonas rurales (Toader & Roman, 2015); esto sin mencionar que este tipo de productor es el más prevalente a nivel mundial (Samberg et al., 2016; Lowder et al., 2016).

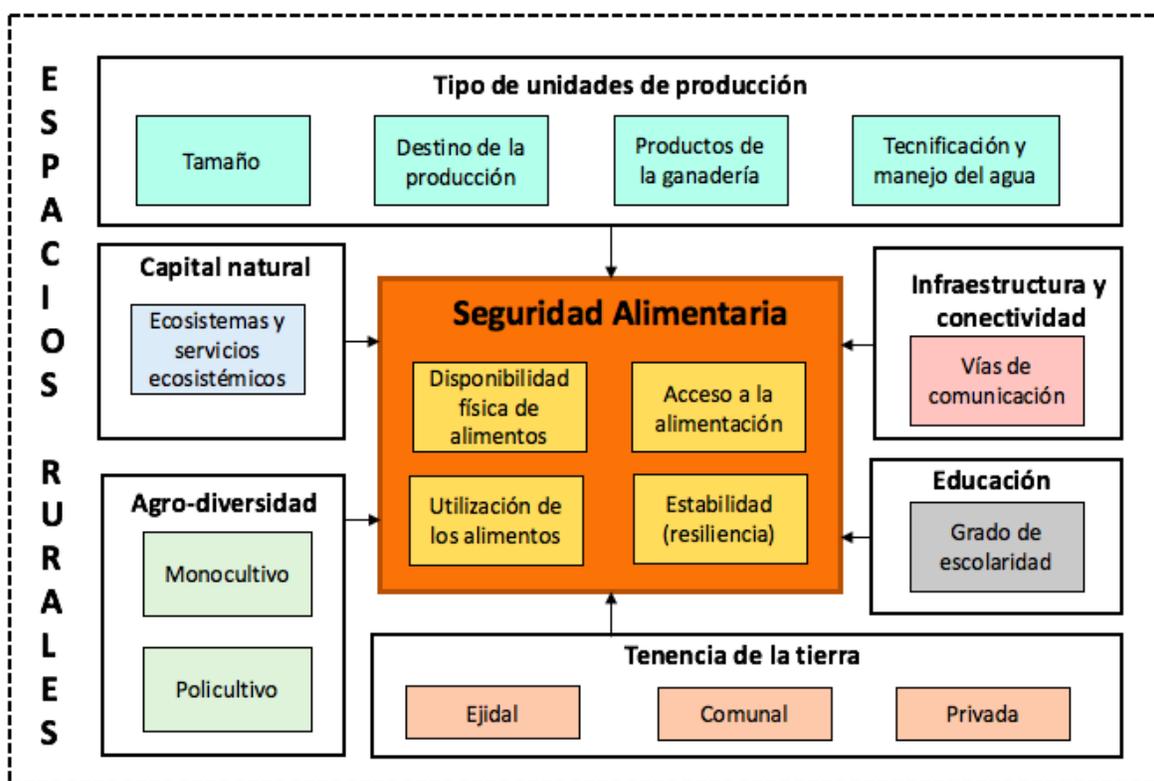


Figura 4. Estructura del sistema agrícola y su relación con la seguridad alimentaria.

Elaboración propia.

Otros trabajos han estudiado la relación entre el destino de la producción y la seguridad alimentaria, identificando como las unidades de producción de subsistencia o autoconsumo abonan más a la condición de seguridad alimentaria que las que son empresariales o comerciales, al ser en el contexto limitado de la población rural, una condición esencial para la seguridad alimentaria a nivel familia (Sibhatu & Qaim, 2017; Gómez-Oliver, 2017; Pelletier et al., 2016). Las unidades de producción de subsistencia o autoconsumo en México se han visto amenazadas por los impactos derivados de la firma del tratado de libre comercio de América del Norte (TLCAN), que ha acelerado el crecimiento del comercio exterior y ha convertido a los grandes productores/exportadores en los principales benefactores (e.g. de frutas, hortalizas y flores), y ha promovido atención limitada a la producción del consumo interno y un déficit creciente de la balanza agropecuaria, propiciando desplazamiento de pequeños productores de subsistencia, abandono de tierras, incremento en la economía informal y migración (Flores, 2013; Guillén, 2012). Algunos estudios han demostrado que existe una asociación entre los sistemas de riego y la agricultura comercial para apoyar la demanda de la población urbana y el comercio exterior, mientras que los sistemas de temporal, según sea el cultivo, se relacionan mayormente con la producción destinada a subsistencia (Rockström et al., 2010; Soto Mora, 2003). Un ejemplo de lo anterior se observa en las familias campesinas mexicanas que cultivan maíz en policultivos de temporal, en asociación con frijol, calabaza, chile, entre otros (conocidos como milpas); estos sistemas de producción están ampliamente distribuidos en las regiones rurales e incluso periurbanas, y representan garantías alimentarias para la dieta de miles de personas en el país (Huato et al., 2014; Bermeo et al., 2014).

El papel del origen de los ingresos de las unidades de producción (diversificación económica) y/o la diversificación productiva también han sido exploradas. La combinación de actividades agropecuarias y no agropecuarias en relación con el ingreso familiar de las unidades de producción, ha sido históricamente una alternativa para contrarrestar las dificultades a las que se exponen los agricultores a veces incluso durante décadas; la diversificación de los medios de vida representa una estrategia ante factores fluctuantes de la estabilidad agrícola en muchos hogares rurales en México (Ávila-Foucat & Rodríguez-Robayo, 2018; Fierros & Ávila-Foucat, 2017; Jarquín Sánchez et al., 2017). Varias investigaciones comentan que la diversidad de cultivos genera agrupaciones de nutrientes y paisajes multifuncionales sostenibles, características que contribuyen a la seguridad alimentaria (Herrero et al., 2017; Bermeo et al., 2014; Altieri et al., 2012). Lo anterior es trascendental de considerar porque bajo las proyecciones de una población con un crecimiento exponencial y con los impactos del cambio ambiental global actuando, la producción de alimentos tendrá que generar capacidades adaptativas ante los nuevos retos. Se estima que por cada grado que aumente la temperatura, se perderá el 2% de tierras cultivables, por lo que los policultivos representan una estrategia para la producción de alimentos más nutritivos resistentes a sequías, inundaciones, mayores temperaturas, y usen la misma cantidad de agua y menos insumos (Sultan et al., 2019; Sombroek & Gommers, 1996).

Respecto a la tenencia de la tierra, la seguridad alimentaria de la población rural está condicionada por el sistema de tenencia de la tierra y al mismo tiempo influye en él (Comité de Seguridad Alimentaria Mundial, 2013), la seguridad alimentaria de los individuos y las familias depende en gran parte de las oportunidades que tienen para mejorar su acceso a activos como la tierra, además del acceso a los mercados y otras oportunidades económicas (Maxwell & Wiebe, 1999). Por lo tanto, las personas con amplios derechos sobre la tierra tienen mayor capacidad de disfrutar de medios de vida sostenibles que quienes cuentan sólo con derechos limitados a ese activo y quienes están desprovisto completamente de tierras (Holden & Ghebru, 2016). Los derechos de propiedad sobre la tierra, junto con la mano de obra, forman el activo más común utilizado para producir alimentos destinados al consumo familiar, así como cultivos comerciales que permiten a la familia o a los individuos suplir otras necesidades, por ejemplo, las relacionadas con la salud y educación. Estos derechos constituyen uno de los recursos más poderosos con los que cuentan las personas para aumentar y ampliar su dotación de activos, no sólo la tierra y la mano de obra sino todo el acervo necesario para disponer de medios de vida sostenibles, a saber, los recursos naturales, el capital social, humano y financiero y los activos físicos (Verburg et al., 2013).

Aunado a la estructura del sistema agrícola, existe una discusión en torno al papel de los ecosistemas y los servicios que estos proveen sobre la seguridad alimentaria y el suministro de alimentos (Bommarco et al., 2018; Garibaldi et al., 2018). La biodiversidad mejora el bienestar humano a través de varios servicios ecosistémicos, que van desde la provisión de material, como es el caso de alimento, madera y fibras; como a partir de servicios de regulación, como son el control biológico de plagas, la polinización y los ciclos de nutrientes, así como con contribuciones no materiales, como la salud, recreación y educación (Pascual et al., 2017). La discusión ha recaído también sobre el papel del sistema agrícola como consumidor de recursos y promotor del cambio en el uso del uso que tiene un impacto protagónico en el mantenimiento de los servicios ecosistémicos y en la producción de alimentos (Zabala, 2018; Galeana et al., 2018; Meyfroidt, 2018), sabiendo que aproximadamente el 60% de los servicios del ecosistema han sido degradados aceleradamente desde 1995 (MEA,

2005). Los niveles bajos de educación también han sido identificados como un determinante de seguridad alimentaria (Félix-Verduzco, et al., 2018).

Debido al carácter multifactorial de la seguridad alimentaria, su análisis debe incorporar la educación (Sen, 1981), pues las personas tienen el potencial para actuar ante situaciones adversas que impiden su desarrollo, por lo que cualquier principio de distribución de alimentos debe centrarse en la mejora de las circunstancias que incrementan el potencial o capacidad (Nebel et al., 2014). Es decir, el bienestar no depende fundamentalmente de los niveles de ingresos, sino del grado de desarrollo de capacidades individuales y colectivas (Nussbaum, 2003); en este sentido, podría decirse que la seguridad alimentaria sólo pueden ser alcanzadas a través de la educación (García & Mirón, 2013; Díaz-Carreño, 2016), la cual determina las preferencias alimentarias, mejora las condiciones económicas, forja la capacidad de participación política y promueve desde la crítica, capacidades adaptativas en favor de estilos de vida saludables y sustentables (FAO, 2019).

El acceso físico de los alimentos es influenciado por factores como la accesibilidad a carretera, la condición de las rutas de comunicación y los patrones de viaje individuales (CONEVAL, 2010). La demanda alimentaria se altera también por las preferencias de los consumidores, que pueden ser motivadas por prácticas y creencias culturales o por la asignación de los alimentos dentro del hogar. Una infraestructura eficiente que incluya carreteras, ferrocarriles, puentes e instalaciones para comercialización, es un factor determinante de la cantidad y el éxito de la distribución de los alimentos a los diferentes grupos sociales. En el mundo en desarrollo y también en algunos países industrializados, las familias que viven cerca de los mercados de alimentos tienen un acceso permanente y fácil a ellos a precios más económicos y logran mantener una dieta más diversificada, mientras que las personas que viven lejos de los mercados por lo general tienen menos posibilidades para elegir sus alimentos (Latham, 2002).

Debido a que las presiones alimentarias provienen especialmente de las zonas urbanas (Meyfroidt, 2018), la mayoría de esfuerzos en investigación han sido desarrollados para dichas áreas (Acuña et al., 2013); reconocemos la importancia de esos esfuerzos sin embargo existe un amplio vacío de información y análisis para abordar la seguridad alimentaria de zonas rurales, las cuales sostienen la demanda de las ciudades pero en ocasiones no suplen de manera adecuada sus propios requerimientos alimenticios y son las que registran mayores tasas de desnutrición (WFP, 2015). Teniendo en cuenta la complejidad socioecológica y la diversidad de sistemas agrícolas en México, es indispensable construir un índice de seguridad alimentaria que pueda ser desagregado para las distintas regiones del país; y generar un modelo conceptual que identifique y evalúe las relaciones directas e indirectas entre los factores que integran la estructura del sistema agrícola y otros conductores como la educación y la accesibilidad respecto a los componentes de seguridad alimentaria (disponibilidad, accesibilidad y utilización) en zonas rurales de las distintas regiones de México.

2.3 Sistemas de información geográfica (SIG) para el análisis de SSE

En la era de la información, la creciente disponibilidad de grandes bases de datos de medios sociales permite comprender mejor las complejas interacciones socioecológicas con una resolución espacio-temporal sin precedentes (Lenormand et al., 2018). La información espacial aporta perspectivas originales sobre la forma en que la esta puede ser estructurada, utilizada y comunicada por/entre los diferentes actores de los procesos de planificación, creando un conocimiento científico más

factible y una toma de decisiones efectivas (La Rosa et al., 2014). Los SSE han sido analizados ampliamente usando información espacial a través de diversos enfoques. Desde el punto de partida: ¿Cómo delimitar el SSE? el análisis espacial cobra relevancia, Martín-López et al. (2017) propusieron una metodología para delimitar los sistemas socio-ecológicos y caracterizar sus principales unidades socioecológicas de manera espacialmente explícita. Las unidades socio-ecológicas representan las interacciones entre los subsistemas biofísicos y socioeconómicos a escala local. La metodología se estructura en cuatro fases: 1) regionalización ecológica, es decir, identificación y cartografía de unidades ecológicas coherentes basadas en variables biofísicas; 2) regionalización socioeconómica, es decir, identificación y cartografía de grupos homogéneos de municipios basados en variables socioeconómicas; 3) identificación de los límites de los sistemas socioecológicos y caracterización de las unidades socioecológicas; y 4) validación de los límites de los sistemas socioecológicos con informantes clave mediante la cartografía participativa. El marco metodológico que propusieron tiene el potencial de poner en práctica el concepto de sistemas socio-ecológicos en la planificación del paisaje.

En términos de técnicas, Abson et al. (2012a) investigaron el uso de análisis de componentes principales (ACP) como medio para crear índices agregados de vulnerabilidad socioecológica espacialmente explícitos. Los mapas de vulnerabilidad resultantes fueron considerados particularmente informativos, ya que indicaron la variabilidad espacial regional de cuatro componentes estadísticamente independientes de la vulnerabilidad socioecológica. También se han construido índices de vulnerabilidad como instrumentos normativos para determinar las esferas de mayor preocupación en lo que respecta tanto al nivel relativo como a las causas subyacentes y los efectos de la vulnerabilidad socioecológica ante los cambios ambientales en escalas espaciales amplias (Abson et al., 2012b). Banos-González et al. (2015) presentaron un modelo dinámico integral: el modelo de sostenibilidad de Fuerteventura (MSF), probado y calibrado para el período 1996-2011. El MSF les permitió comprender los principales componentes de ese sistema socio-ecológico y sus cambios a lo largo del tiempo, así como la interacción entre los indicadores de sostenibilidad y otros factores dentro del sistema. Otro enfoque es el de modelado de la Red de Creencias Bayesianas para investigar una diversa gama de impulsores sociales y ecológicos cualitativos y cuantitativos sobre la elección de la ubicación espacial de cuestiones que tienen un efecto socio-ecológico potencial. Por ejemplo, Naranjo-Madrigal et al. (2015) incluyeron datos empíricos y observadores para mostrar la influencia de los factores económicos, las condiciones ambientales y las interacciones sociales en el proceso de adopción de decisiones sobre la elección de la ubicación espacial en una pesquería artesanal multiespecífica de Costa Rica.

Kok et al. (2016) desarrollaron un nuevo método para analizar los patrones socio-ecológicos de vulnerabilidad de las personas que corren el riesgo de perder sus medios de vida como consecuencia del cambio ambiental mundial. El método propuesto constó de cuatro pasos: 1) determinación del sistema socioecológico expuesto a los cambios ambientales, 2) definición de las dimensiones básicas que configuran la vulnerabilidad en el sistema socioecológico de interés, 3) selección de un conjunto de indicadores espacialmente explícitos que reflejen las dimensiones básicas, en ese sentido, el análisis de conglomerados se utiliza para agrupar los datos de los indicadores. Las agrupaciones encontradas, se denominan perfiles de vulnerabilidad y describen diferentes agrupaciones típicas de condiciones y procesos que crean vulnerabilidad en el sistema socioecológico objeto de estudio, y se proporciona su distribución espacial, y 4) La interpretación y verificación de los perfiles como

último paso del análisis. La vulnerabilidad también ha sido abordada a través del enfoque de servicios ecosistémicos (SE), por ejemplo, Laterra et al. (2016) mencionan que paradójicamente, los enfoques cartográficos destinados a informar las decisiones políticas se centran en la magnitud y la distribución espacial del suministro biofísico de los SE, ignorando en gran medida los mecanismos sociales por los que estos servicios influyen en el bienestar humano. Los autores, desarrollaron y aplicaron una nueva rutina de mapeo a dos sistemas socio-ecológicos distintos, mostraron un fuerte desacoplamiento espacial entre la oferta de SE y la vulnerabilidad socio-ecológica a la pérdida de SE, bajo escenarios de cambio de uso de la tierra y de cobertura. En ese sentido, las políticas públicas basadas en la oferta de SE podrían no sólo fracasar en la detección de áreas de conservación prioritarias para el bienestar de las sociedades humanas, sino que también podrían aumentar su vulnerabilidad al descuidar áreas de oferta de SE actualmente bajas, pero altamente valoradas. En términos de políticas, la cuantificación de la resiliencia espacial puede ser un instrumento útil para la planificación y la gestión de las tierras en los sistemas agrícolas a fin de predecir el control adecuado de perturbaciones. Por esto, Rescia & Ortega, (2018) propusieron un índice de resiliencia espacial basado en indicadores de paisaje relacionados con la abundancia de la plaga más importante de los olivares mediterráneos, *Bactrocera oleae*; estos autores concluyeron que la aplicación del índice de resiliencia espacial contribuye a una evaluación objetiva de la calidad ecológica del paisaje agrícola, requisito básico para la percepción de los subsidios ambientales por parte de los agricultores.

Barton et al. (2010) usaron modelización computacional estudiaron las retroalimentaciones entre el uso de la tierra, la cubierta terrestre, la topografía y el agua superficial. Recientemente, Hori et al. (2020), desarrollaron un modelo de proyección de la distribución futura de la población sobre la base de la actual tendencia de despoblación del Japón. El análisis superpuesto de los mapas de utilización de la tierra en el futuro y los mapas de distribución de la población simulada contribuyeron a identificar las zonas en que debería gestionarse el capital natural, como las tierras agrícolas y las plantaciones forestales, mismas en las que se producirá una importante pérdida de población para 2050. Estos experimentos computacionales con SIG aportaron nuevos conocimientos sobre las consecuencias socioecológicas de las decisiones humanas a diferentes escalas temporales y espaciales. Cioffi-Revilla (2016) realizó una revisión profunda del uso de modelos basados en agentes (MBA) espaciales para el análisis de SSE, menciona que estos permiten el análisis de escenarios simples y complejos para el análisis de políticas, en formas que no son factibles mediante enfoques matemáticos o estadísticos más tradicionales (por ejemplo, la modelización econométrica). Además, enfatizó en que como todos los modelos, los MBA son abstracciones destinadas a representar aspectos seleccionados de la realidad. En el caso de los sistemas socioecológicos, un MBA casi siempre tendrá una representación espacial, a menudo con capas de SIG, y las entidades incluirán entidades y dinámicas clave de componentes humanos y naturales. En torno a esta misma temática, Filatova et al. (2013) examinaron los progresos realizados en los MBA espaciales en consonancia con cuatro desafíos metodológicos: 1) diseño y parametrización de modelos de decisión de agentes, 2) verificación, validación y análisis de sensibilidad, 3) integración de modelos sociodemográficos, ecológicos y biofísicos, y 4) representación espacial.

Daron et al. (2015) analizaron el valor de los resultados de los modelos climáticos regionales a escala reducida en la gestión de los sistemas socio-ecológicos complejos vulnerables al cambio climático.

El desarrollo metodológico de esta investigación concluyó que estudiar las dependencias de los sistemas de escala cruzada puede ayudar a comprender cómo podrían evolucionar los SSE en escenarios sociales y ambientales futuros alternativos. Liu et al. (2016) presentaron un complejo sistema de índices para analizar la vulnerabilidad al cambio climático a escala regional con una resolución de 1 km × 1 km. Sobre la base del marco de evaluación, que incluyó los recursos naturales, el medio ambiente natural y la economía social, los resultados indicaron que bajo el método aplicado, un ecosistema en una zona montañosa es más vulnerable que en una llanura. La información espacial también ha sido usada para analizar cuestiones del agua, por ejemplo, Madrid-López & Giampietro (2015) indicaron que es necesario el desarrollo de la hidrología hacia una socio-eco-hidrología (SE-hidrología), pero que hasta esa fecha carecía de una conceptualización del sistema hídrico humano acoplado para integrar la evaluación de los procesos hídricos a diferentes tasas y escalas. Por ello, proponen un marco conceptual, basado en el análisis integrado de escalas múltiples del enfoque del metabolismo social y del ecosistema, que combina las perspectivas de la hidrología y del metabolismo social. Dicho marco describe la sociedad y el ecosistema incrustado como dos niveles distintos del mismo sistema jerárquico (es decir, el sistema socioecológico), expresando dos patrones metabólicos distintos, pero estrechamente interconectados (sociedad y ecosistema) a diferentes escalas espacio-temporales.

El enfoque de SSE y la información espacial también ha sido considerada para cuestiones de salud, por ejemplo, Gou et al. (2017) exploraron la influencia de los factores socioecológicos en la enfermedad de la fiebre aftosa mediante el uso de modelos espaciales bayesianos y patrones espaciales identificados en las regiones secas de Gansu (China). Incluso han sido usados para el análisis de la biodiversidad incluyendo arduos trabajos en campo para la verificación; Struebig et al. (2018) mencionan que aunque los tigres de Sumatra (*Panthera tigris sumatrae*) están en peligro crítico debido a la deforestación y la persecución; en algunos lugares siguen coexistiendo con las personas, ofreciendo una visión de la vida silvestre de la mañana en otros lugares. Ellos, usaron los modelos espaciales de riesgo de encuentro con la información sobre la tolerancia de 2,386 Sumatrans para revelar los factores que impulsan el conflicto entre humanos y tigres. El riesgo de encontrar tigres en dicho artículo fue mayor alrededor de las aldeas pobladas que colindaban con bosques o ríos que conectaban el hábitat del tigre; los perfiles geográficos refinaron dichas predicciones en tres áreas centrales. La tolerancia de la gente hacia los tigres estaba relacionada con actitudes, emociones, normas y creencias espirituales subyacentes. Combinando esta información en modelos socio-ecológicos obtuvieron predicciones de tolerancia que eran 32 veces mejores que los modelos basados sólo en predictores sociales. Este trabajo proporcionó más pruebas sobre los beneficios de la integración del espacio y el análisis de SSE sobre los conflictos de conservación. Finalmente, se han analizado cuestiones sin necesidad de trabajo de campo e incluso usando datos de diversos países dentro de un mismo continente; Lenormand et al. (2018), modelaron y analizaron interacciones sobre la base de la información extraída de las fotografías etiquetadas geográficamente e integradas en una red socioecológica de escala múltiple. Aplicaron ese enfoque a 16 sitios de estudio de casos en Europa utilizando una base de datos de medios sociales (Flickr) que contiene más de 150.000 fotografías validadas y clasificadas. El enfoque que desarrollaron integra los datos de los medios sociales en un marco basado en la red, y ofrece una nueva forma de visualizar y modelar las interacciones entre los humanos y los paisajes.

2.4 Sistemas de información geográfica para el análisis de seguridad alimentaria

Para comprender el fenómeno de Seguridad Alimentaria con énfasis en su comportamiento en el espacio geográfico, es indispensable conocer el funcionamiento y articulación de los pilares que la componen, identificando los elementos clave que expresen el dinamismo socio-ecológico que está asociado con determinantes vinculados con áreas geográficas y agrícolas, como es la producción, capacidad de importación, existencia de alimentos, disponibilidad de agua, tierras agrícolas, densidad poblacional, entre otros (Feizizadeh et al., 2015). Diversas aportaciones se han generado desde disciplinas como geografía, ciencias de información geoespacial y geomática, que derivan en un conocimiento para entender las interacciones existentes en un territorio a partir de la implementación de diversas técnicas analíticas de la escuela de pensamiento de análisis geoespacial a través de herramientas de sistemas de información geográfica y percepción remota, en el diseño de políticas públicas y la generación de instrumentos de seguimiento y evaluación territorial (Reyes et al. 2006).

Dentro de la revisión del estado del arte los principales enfoques abordados con herramientas de analítica espacial son estudios dirigidos a: i) Mapeo de ambientes alimentarios y relacionados a la prevalencia de enfermedades relacionadas con los alimentos para el acceso, uso y disponibilidad alimentaria (Sweeney et al., 2016; Peters et al. 2008), ii) Evaluación de cambios de uso de suelo y coberturas terrestres para la disponibilidad de superficies para la producción de alimentos (Zabala, 2018; Behera et al., 2016; Rutten et al., 2014), iii) Identificación de los efectos de factores y atributos biofísicos y socioeconómicos como determinantes de seguridad alimentaria (patrones de consumo y gasto alimentario), donde se han destacado los estudios de econometría espacial (Putra et al., 2020, Leonard et al., 2014; Morrison et al., 2011), iv) Modelación de efectos del cambio climático en la agricultura y los recursos naturales, así como predicciones espaciales agrometeorológicas (e.g. sequías) en una traducción a índices de vulnerabilidad (Merem et al., 2019; Harini & Susilo, 2017; Feizizadeh et al., 2015), y v) Monitoreo mediante imágenes de satélite para la optimización de para determinar la idoneidad y capacidad de la tierra; estudios de densidad, vigor, tasas de crecimiento y madurez de los cultivos; recursos hídricos y actividades de riego (Kogan, 2019; Konan-Waidhet et al., 2013; Thenkabail et al., 2013).

Recientemente, Sunderland et al. (2017) en su documento destacan el Proyecto de Cambio Agrario, como una iniciativa de investigación multidisciplinaria que aplica metodologías socioecológicas detalladas en paisajes multifuncionales, y evalúa las consiguientes consecuencias para la conservación, los medios de vida y la seguridad alimentaria. Concretamente, la investigación se centró en los efectos del uso de la tierra en lugares que presentan diversas combinaciones de modificación/cambio agrícola a lo largo de un gradiente de transición forestal en seis paisajes tropicales en Zambia, Burkina Faso, Camerún, Etiopía, Indonesia y Bangladesh. Estos métodos incluyeron evaluaciones integradas de las percepciones de la prestación de servicios de los ecosistemas, la pérdida y ganancia de la cubierta arbórea, la pobreza relativa, las dietas y las pautas de cambio agrícola. El artículo destaca que aunque cada año se realizan numerosos estudios sobre los medios de vida rurales, a menudo con un gran costo, muchos de ellos se ven obstaculizados por las deficiencias de los métodos y, por lo tanto, pueden no reflejar las realidades rurales. Por ello, se hace necesario poner de relieve la forma en que la integración de métodos socioecológicos más amplios puede utilizarse para disminuir esas lagunas y asegurar que esas realidades se capturen

efectivamente. Las primeras conclusiones de estos autores, sugieren que la transición de un paisaje boscoso a un sistema más dominado por la agricultura no se traduce necesariamente en mejores resultados en cuanto a los medios de vida y puede haber consecuencias no deseadas de la eliminación de los bosques y la cubierta arbórea. Entre ellas figuran la pérdida de acceso a las tierras de pastoreo, la pérdida de diversidad alimentaria y la pérdida de servicios del ecosistema/productos forestales.

- **Elección de la escala espacial**

La representación espacial de la diversidad en el contexto ambiental, así como los resultados divergentes de las simulaciones de los modelos es un componente importante de muchos artículos de investigación, los cuales no indican sistemáticamente el fundamento de las opciones para elegir una resolución o extensión espacial específica. En muchos casos la representación espacial se elige con base en los datos típicos disponibles y de acuerdo con la variación espacial de los procesos descritos para modelar las dinámicas de interés (Filatova et al., 2013). Smajgl & Bohensky (2013) utilizan los datos de un censo para ampliar la escala en otra medida geográfica. Por consiguiente, la resolución espacial del modelo está limitada por las unidades administrativas para las que se disponía de información censal. Gaube & Remesch (2013) cruzan "tipos de zonas urbanas" con distritos administrativos para crear 59 divisiones espaciales para la ciudad de Viena, con lo que también modelan a una resolución espacial bastante gruesa. Rebaudo & Dangles (2013) modelan a escala de granja, usando relaciones espaciales de vecindad para definir también las influencias sociales de los vecinos. Parry et al. (2013) ejecutan su modelo a escala de granja, pero su modelo basado en el individuo contiene modelos de ubicación del territorio y de búsqueda de alimento que crean patrones de redes espaciales más complejos. Marohn et al. (2013) utilizan una alta resolución espacial en el modelo, pues para ellos es importante evaluar los impactos biofísicos espacialmente variables de las decisiones sobre el cambio de la tierra. Entre ellos se incluye, entre otros, la dinámica del suelo, que sólo puede simularse en un paisaje muy heterogéneo si se considera una alta resolución espacial. Sun & Müller (2013) utilizaron datos del SIG sobre características heterogéneas de la tierra (tamaño del lote, calidad del suelo, distancias, pendiente) enriquecidos con datos cartográficos participativos (indicaciones de uso de la tierra, puntos de referencia y límites) de 17 pueblos de China.

Barnaud et al. (2013) no sólo examinaron las formas en que la diversidad espacial puede representarse en los modelos, sino que también han analizado el papel de las presentaciones espaciales de los resultados de los modelos en el uso de éstos como instrumento de negociación con las partes interesadas. Resulta interesante que, si bien las representaciones espaciales proporcionan a los interesados un marco amplio para las negociaciones, también hacen que éstos se centren más en la división del espacio que en la utilización multifuncional de los recursos espaciales. El espacio social dinámico (una red a través de la cual se transmite la dinámica de la opinión) y el espacio biofísico heterogéneo (el paisaje) coexisten en el marco de IAMO-LUC (Sun & Müller, 2013). Las decisiones sobre el uso de la tierra están influenciadas por agentes pares conectados a través de una red de pequeño mundo. Como los datos se reunieron a nivel de aldea y de hogar, en este caso la red social para la dinámica de la opinión se aplica de manera jerárquica vinculando a los agricultores de una aldea con una probabilidad mayor que la de vincularlos con los agricultores de otra comunidad.

Capítulo 3

Métodos

3.1 Áreas de Estudio

Para abordar la seguridad alimentaria mexicana, se requieren modelos que consideren la estructura del sistema agrícola como base del sustento del sistema agroalimentario, a través de análisis espaciales en unidades geográficas coherentes. Las ecorregiones son unidades espaciales discretas que comparten funciones ecosistémicas, recursos naturales y actividades humanas similares (McDonald et al., 2005). En este trabajo se consideran las ecorregiones como un concepto útil para abordar la seguridad alimentaria mexicana, pues el país posee realidades regionales contrastantes (Torres, 2002). La regionalización basada en ecorregiones tiene como antecedente la expresión espacial de los reinos biogeográficos de Pielou (1979) así como la transición al análisis a nivel Biomas (Ricketts et al., 1999), con los cuales se dividió el planeta en 825 ecorregiones terrestres, agregadas en 14 biomas y 8 reinos biogeográficos (Figura 5). Esta regionalización representa un esfuerzo por definir los límites por parte de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) que es una organización internacional integrada por Canadá, EU y México. Fue creada en términos del Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA, 1997) en colaboración con un conjunto de más de 100 especialistas en biogeografía a nivel mundial para el ajuste regional (Olson et al., 2002).

El propósito de la regionalización fue estandarizar una herramienta para la conservación de la biodiversidad (McDonald et al., 2005; Dvorak & Volder, 2010), bajo el supuesto de priorización de las áreas de mayor valor ambiental, a partir de la integración de los endemismos encontrados, riqueza de especies y hábitats, rasgos que conforman a la biodiversidad (Olson et al., 2002). Lo anterior, tiene el potencial de focalizar las estrategias de conservación para la permanencia y persistencia futura de poblaciones y procesos ecológicos, en particular, en aquellas donde coexisten con una serie de alteraciones humanas (Margules and Pressey, 2000) y para caracterizar los ecosistemas terrestres (Koleff et al., 2009; Koleff & Urquiza-Haas, 2011)

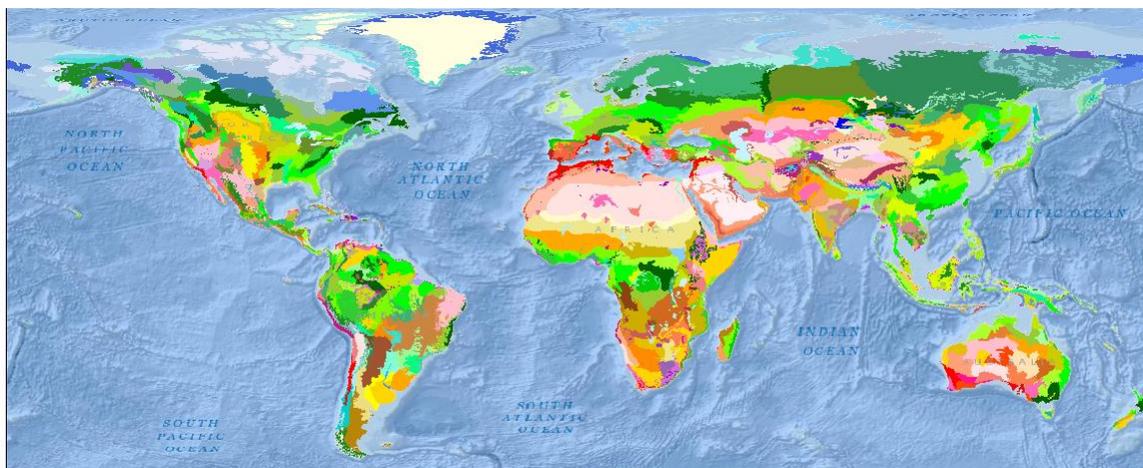


Figura 5. Ecorregiones terrestres del mundo. Elaboración propia; Datos: World Wildlife Fund, 2004.

México presenta 7 de las 14 ecorregiones que se identificaron a nivel de Norte América (Koleff y Urquiza-Haas, 2011): Bosques tropicales húmedos, Bosques tropicales secos, California mediterránea, Desiertos norteamericanos, Elevaciones semiáridas del sur, Grandes planicies y

Sierras templadas (Figura 6), los cuales albergan una gran diversidad de ambientes, paisajes y comunidades únicas (Tabla 1); estas 7 ecorregiones a nivel nacional representan el área de estudio de la presente tesis.

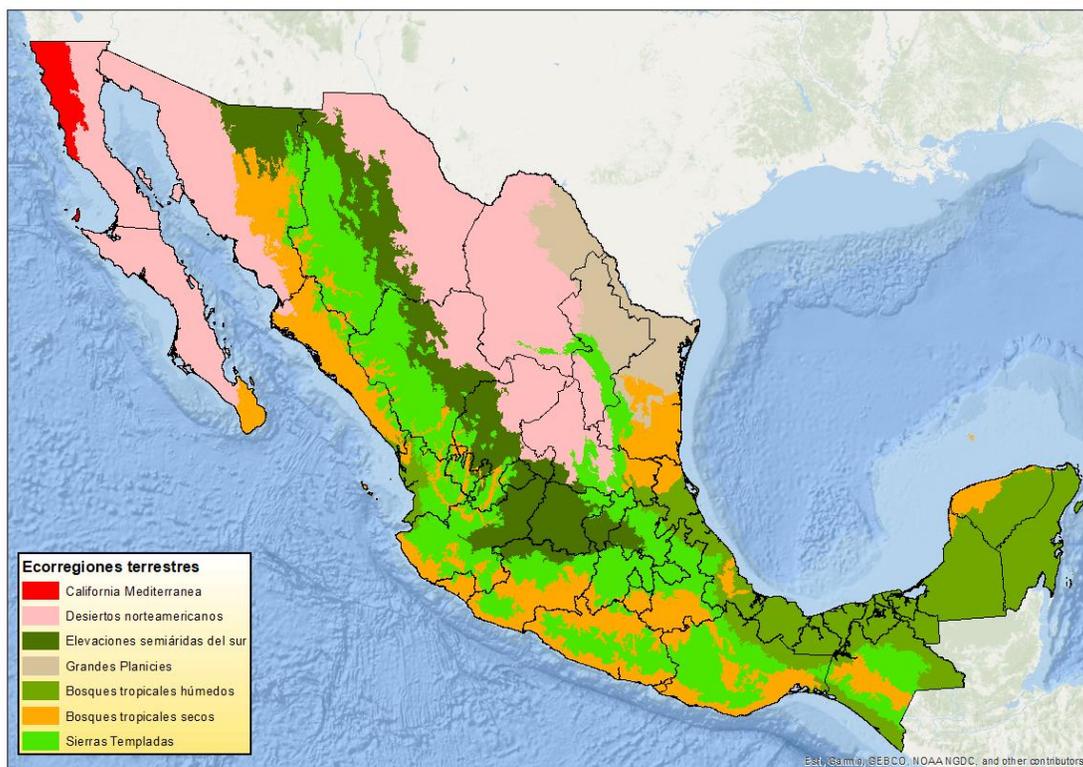


Figura 6. Ecorregiones en México. Elaboración propia; Datos: World Wildlife Fund, 2004.

Tabla 1. Rasgos físicos de las ecorregiones en México (tomado de Koleff & Urquiza-Haas, 2011)

Ecorregiones	Número total de tipos climáticos	Precipitación	T mínima (°C)	T máxima (°C)	Superficie (km ²)	Superficie (%)	Vertebrados
Grandes planicies	15	200 a 1500	16 a 18	24 a 26	106,832	5.5	750
Desiertos norteamericanos	25	<50 a 1000	10 a 12	24 a 26	556,985	28.7	1000
California mediterránea	8	50 a 500	10 a 12	18 a 20	25,291	1.3	400
Elevaciones semiáridas del sur	25	200 a 1500	8 a 10	22 a 24	228,625	11.8	1000
Sierras templadas	45	200 a >4500	< -2	> 28	431,614	22.2	1980
Bosques tropicales secos	35	50 a 2500	12 a 14	> 28	318,314	16.4	1890
Bosques tropicales húmedos	19	600 a >4500	14 a 16	26 a 28	276,202	14.2	1650

3.2 Fuentes de Datos

En este trabajo se presenta la primera evaluación de cambio de uso del suelo en México para un período de 35 años (1976–2011), centrada en la actividad agropecuaria extensiva versus la vegetación natural. Como lo mostraron estudios previos hasta 2007 (Mas et al., 2004; Mas et al., 2009). Esta sección contiene la descripción de las fuentes de información empleadas: 1) Series de Uso de Suelo y vegetación, 2) Censos agropecuarios y ejidales, 3) Censos de población y vivienda, 4) Índice de Marginación, 5) Anuario Estadístico de la Producción Agrícola y Pecuaria, 6) Red Nacional de caminos, y 7) Estadísticas de desnutrición y otras deficiencias nutrimentales del Sistema Nacional de Información en Salud.

Series de uso de suelo y vegetación. La cartografía oficial de Uso del Suelo y Vegetación (escala 1:250,000) del país, es elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) desde 1978. Con ella se cubre la necesidad de disponer de un marco nacional que permita conocer la distribución y el estado de la vegetación en la totalidad del territorio nacional en diferentes periodos de tiempo, lo que ha permitido realizar estudios temporales y cuantificar los cambios en la vegetación entre estos periodos (INEGI, 2017). Actualmente existen seis versiones cartográficas denominadas: Serie I (1976) Serie II (1993), Serie III (2002), Serie IV (2007), Serie V (2011) y serie VI (2014)² a escala 1:250,000 (Tabla 2). A excepción de las Serie I y II que fueron elaboradas de manera analógica, la información del resto de las series es generada a partir de datos estructurados en formato vectorial codificados en un ámbito de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Estas series se generaron a partir de un sistema de clasificación que abarca más de 300 categorías, que pueden ser segmentadas en tres grandes grupos: 1) Comunidades vegetales con base en criterios de fisonomía, florística, fenología y el grado de perturbación o estado de conservación, 2) Agroecosistemas, definidos como los sistemas manejados por el hombre que constituyen una cubierta de vegetación manejada y 3) Información que no hace parte de la cobertura vegetal ni de las áreas manejadas pero que incide sobre éstas (e.g. asentamientos humanos y cuerpos de agua) (INEGI, 2017).

Tabla 2. Información de las Series de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI.

Mapas de uso de suelo y vegetación	Insumo satelital usado	Fechas de publicación	Método usado
1976	Fotografías aéreas	1968-1986	Fotointerpretación y trabajo de campo
1993	Imágenes Landsat TM	1993	Actualización de 1976 con base Interpretación de las imágenes de satélite y trabajo de campo

² Los años señalados están asociados a los insumos satelitales usados para la generación de cada serie, y no hacen referencia al año de publicación editorial de las series.

2002	Imágenes Landsat ETM	2002-2003	Interpretación de las imágenes de satélite y trabajo de campo
2007	Imágenes SPOT-V	2007-2008	Interpretación de las imágenes de satélite y trabajo de campo
2011	Imágenes Landsat TM	2011	Interpretación de las imágenes de satélite y trabajo de campo
2014	Imágenes Landsat OLI	2016	Interpretación de las imágenes de satélite y trabajo de campo

Censo agropecuario y ejidal. El VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal de INEGI se realizó en el 2007 para recolectar información de la estructura del sector agropecuario y forestal, así como información básica sobre las características económicas y tecnológicas de las unidades de producción. Las unidades de observación consideradas en el Censo fueron las unidades de producción³ y las viviendas con cría y explotación de animales⁴ (INEGI, 2013). La segmentación temática del censo agropecuario se distribuye en 13 grandes secciones y busca satisfacer la demanda de las instituciones usuarias de información agrícola, ganadera y forestal considerando recomendaciones internacionales (e.g. FAO). Los temas que abarca el censo son: características generales, agricultura, superficie de agostadero o enmontada, aprovechamiento forestal, cría y explotación de animales, destino de la producción agrícola, ganadera y forestal, tecnología agropecuaria, créditos y seguros, organización para el manejo de la unidad de producción y mano de obra, organización de los productores, capacitación y asistencia técnica, actividad y problemática principal asociada a la producción, y características sociodemográficas del productor (INEGI, 2013). Es importante mencionar que la información de **Censo agropecuario de 1991** no fue incluida porque no se tuvo acceso a los datos oficiales, en el tiempo de la realización del trabajo experimental, por lo que será objeto un análisis posterior.

Censos de población y vivienda. Los censos de población y vivienda de INEGI son de los proyectos estadísticos de mayor relevancia e impacto en el país, porque permiten visualizar la situación demográfica en diferentes niveles administrativos, así como de las principales características socioeconómicas de los habitantes y sus viviendas (INEGI, 2011). Debido a que este instrumento incluye como población objetivo a las personas residentes en el país, se considera como de apoyo fundamental en la definición de políticas públicas y de la agenda nacional, así como en la toma de decisiones de diversos sectores de la sociedad. Estos censos se han realizado desde la época prehispánica, se sabe que en 1895 se realizó el primer censo general de la república mexicana de la

³ Las unidades de producción son un conjunto formado por los terrenos con o sin actividad agropecuaria o forestal en el área rural o con actividad agropecuaria en el área urbana, ubicados en un mismo municipio; los animales que se posean o críen por su carne, leche, huevo, piel, miel o para trabajo, independientemente del lugar donde se encuentren; así como los equipos, maquinarias y vehículos destinados a las actividades agrícolas, pecuarias o forestales; siempre que durante el periodo de marzo a septiembre de 2007, todo esto se haya manejado bajo una misma administración.

⁴ Corresponde a las unidades de observación con cría y explotación de animales sin terrenos fuera del poblado.

época moderna, que significó el establecimiento de la línea base y la tradición censal a través de décadas hasta la actualidad (INEGI, 2011). Los censos empleados en el presente estudio fueron las relacionadas a los periodos de 1980, 2000, 2010; así como las estimaciones intercensales de 1995 y 2005.

Índice de marginación. El índice de marginación es un instrumento generado por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), su primera publicación se realizó en 1994 con datos del Censo de 1990 (CONAPO, 1994) y ha venido actualizándose cada cinco años para las entidades federativas y municipios del país a partir de la información de los censos y conteos de población consecuentes (CONAPO, 2011) y las reconstrucciones para las décadas de los 70s y 80s como parte de un análisis históricos (Peláez Herreros, 2017) que busca construir un instrumento comparable en el tiempo que permita conocer la evolución de la marginación en México (CONAPO, 2011). Es importante mencionar que la marginación en este caso es conceptualizada como un *“fenómeno multidimensional y estructural, como resultado del modelo de producción económico expresado en la desigualdad de la distribución del progreso, en la estructura productiva y en la exclusión de diversos grupos sociales”* (INEGI, 2011).

El Índice de marginación está integrado por nueve indicadores que son combinados a través de métodos factoriales como el método de componentes principales (primer componente), y posteriormente clasificados en cinco categorías diferenciadas mediante el método de estratificación óptima de Dalenius y Hodges (CONAPO, 2012). Los indicadores socioeconómicos empleados en este instrumento tienen como base la información de los Censos de Población y Vivienda según sea el año de estimación, clasificados en 4 grandes dimensiones socioeconómicas: Educación, vivienda, distribución de la población e ingresos monetarios. Su relevancia ha trascendido en diferentes sectores gubernamentales y académicos, por ejemplo, este índice ha sido recientemente usado para identificar las zonas de atención prioritaria que tienen acceso a determinados fondos y programas gubernamentales para el combate a la marginación y la potenciación del desarrollo (Peláez-Herreros, 2017). Las estimaciones empleadas en el presente estudio fueron las relacionadas a los periodos de 1980, 1995, 2000, 2005 y 2010.

Anuario estadístico de la producción agrícola y pecuaria. Las estadísticas de producción agrícola y pecuaria son realizadas por el Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Dichas estadísticas ponen a disposición los cierres agrícolas y ganaderos desde 1980 a la actualidad, permitiendo caracterizar según diferentes unidades administrativas (e.g. municipio) a una serie de variables de producción y productividad de los cultivos y tipos de ganado (e.g. superficies sembradas y cosechadas, producción, valor de la producción, animales sacrificados, entre otras). Las estimaciones empleadas en el presente estudio fueron las relacionadas a los periodos de 1980, 1993, 2002, 2007 y 2011.

Red nacional de caminos. La red nacional de caminos es un esfuerzo compartido realizado por el INEGI y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), que tiene la finalidad de poner a disposición una capa única y estandarizada de las vías de transporte terrestre del País (IMT, 2015). Dicho producto tiene como base el Conjunto Nacional de Carreteras y Vialidades, que integra las carreteras de los conjuntos vectoriales topográficos a escala 1:50000, ejes de calle de la cartografía censal del 2010, así como carreteras nuevas detectadas en el Inventario Nacional de Infraestructura para el Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, e imágenes de satélite SPOT 2008-

2012 y GeoEye 2012-2013 (IMT, 2015). Además, incluye el componente geométrico de la red de caminos (arcos y nodos). Este producto tiene una base de atributos asociados a características de las vialidades como son: el tipo de vialidad, tipo de superficie y condición, número de vías vehiculares, administración y jurisdicción, longitud y ancho de la vialidad, entre otros (IMT, 2015).

Sistema nacional de información en salud (SINAIS). El sistema de información básica en materia de salud es un instrumento de la Secretaría de Salud, cuyo propósito se centra en tres aspectos de la dimensión salud: 1) Estadísticas de natalidad, mortalidad, morbilidad e invalidez; 2) Factores demográficos, económicos, sociales y ambientales vinculados a la salud, y 3) Recursos físicos, humanos y financieros disponibles para la protección de la salud de la población y su utilización. La información que concentra el SINAIS es generada por las unidades médicas según las jurisdicciones sanitarias existentes en el país por la Secretaría de Salud y los servicios estatales de salud, concentrando la información de morbilidad y mortalidad en México en grandes bases de datos anuales, con registros que presentan como referencia espacial la localidad de residencia desde el año 2000 hasta la actualidad (DGIS, 2019). La clasificación de las enfermedades asociadas a la morbilidad y mortalidad se basa en la Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades y Problemas Relacionados con la Salud (CIE10) de la Organización Mundial de la Salud (OMS), de la cual, para la presente investigación, se seleccionaron solamente los datos de morbilidad asociados a la desnutrición y otras deficiencias nutrimentales (DGIS, 2019). Las estimaciones empleadas en el presente estudio fueron las relacionadas a los periodos de 2007-2017.

3.3 Métodos

Esta sección fue dividida en dos partes: 1) el método asociado a la construcción del índice de eficiencia alimentaria y ambiental, y 2) la construcción del modelo de ecuaciones estructurales de la Seguridad Alimentaria Rural en México.

3.3.1 Índice de Eficiencia Alimentaria y Ambiental

Para la construcción del índice de eficiencia alimentaria y ambiental, el primer paso fue elaborar los indicadores de seguridad alimentaria: Acceso a la alimentación y Disponibilidad a la alimentación (autosuficiencia alimentaria) de maíz, frijol, trigo, arroz, ganado bovino y ganado ovino. Posteriormente, se llevó a cabo la modelación espacial de los procesos de cambio de uso de suelo con énfasis en la expansión agrícola y pecuaria a través de las Series de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI (Serie I - Serie V). Luego se realizó el análisis de tendencias espacio-temporales a través de la estimación de los coeficientes de correlación de Spearman por ecorregión. Y por último, se establecieron las reglas o criterios de decisión para su integración en el índice de eficiencia alimentaria y ambiental según el proceso de cambio de uso de suelo (Figura 7).

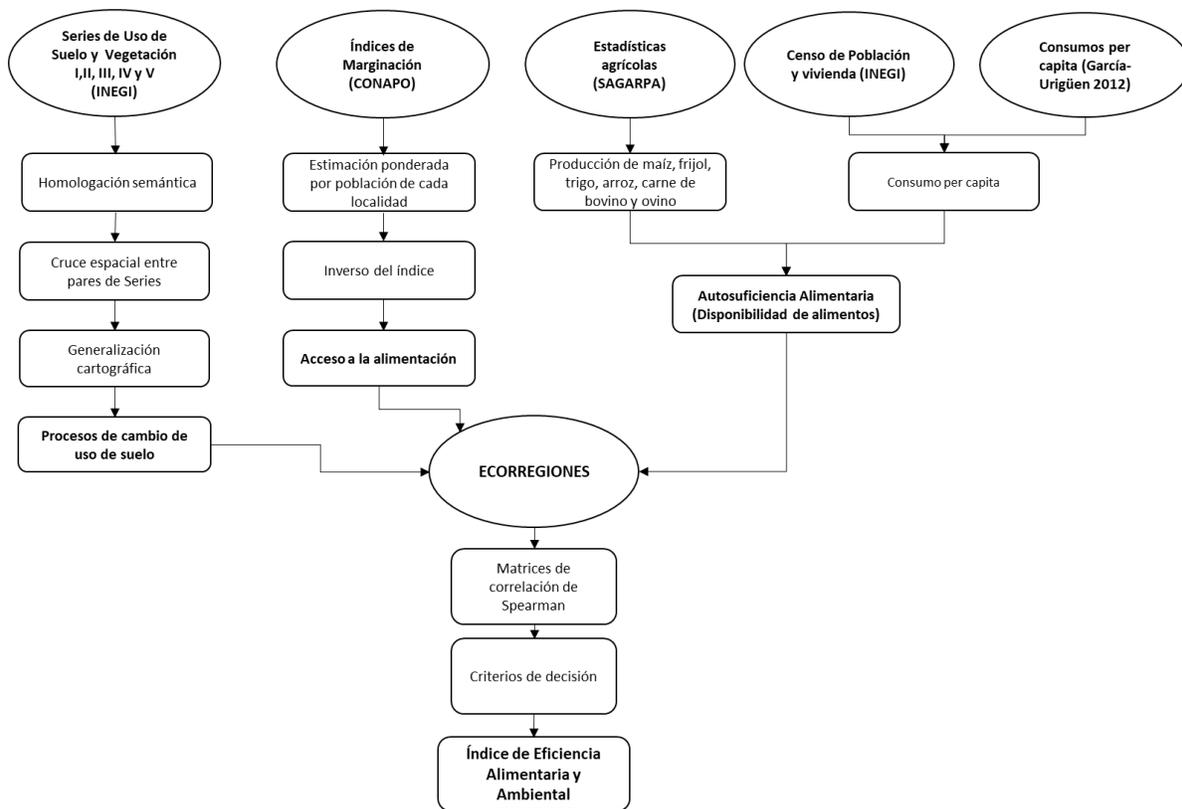


Figura 7. Diagrama general del índice de Eficiencia Alimentaria y Ambiental

3.3.1.1 Marco Metodológico asociado al Análisis de Tendencia y Correlación

La comprensión de series de tiempo o series cronológicas se vuelve transcendental dentro del análisis de la dinámica espacio-temporal de fenómenos geográficos. Estos se basan en conjunto de datos históricos, predominantemente numéricos que se obtienen en periodos regulares o específicos a través del tiempo (Hamilton, 1994). Matemáticamente, una serie de tiempo se define por los valores $Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_n$, de una variable Y en tiempos $t_1, t_2, t_3 \dots t_n$. Reemplazando X por la temporalidad asociada, la serie de tiempo se define como una distribución de pares ordenados (X, Y) en el plano cartesiano, siendo Y una función de X (Wei, 2006), a partir de la Ecuación 1.

$$Y = f(t) \rightarrow Y = f(X) \quad (\text{Ec. 1})$$

Las tendencias ascendentes o descendentes de una variable a lo largo de una serie cronológica generalmente se representan por medio de una línea recta de ajuste con los datos, donde una pendiente significativa indica presencia de tendencia: aumento (+) o disminución en el tiempo (-) bajo el supuesto de un ritmo constante (Wei, 2006). Un método general para encontrar la mejor estimación, suponiendo que los errores son aleatorios, es a partir de mínimos cuadrados (Altman & Krzywinski, 2015; Hamilton, 1994); que se define como la línea que hace mínima la suma de los cuadrados de las desviaciones respecto a ella de todos los puntos que corresponden a la información recogida. Su expresión general se basa en la ecuación de una recta $y = mx + b$. Donde m (Ecuación 2) es la pendiente y b el intercepto (Ecuación 3):

$$m = \frac{n \cdot \sum(x \cdot y) - \sum x \cdot \sum y}{n \cdot \sum x^2 - |\sum x^2|} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$b = \frac{\sum y \cdot \sum x^2 - \sum x \cdot \sum(x \cdot y)}{n \cdot \sum x^2 - |\sum x^2|} \quad (\text{Ec. 3})$$

Este método se liga de forma operativa con la explicación de una posible relación entre una variable independiente y una variable dependiente a través de los análisis de correlación (Altman & Krzywinski, 2015). Los análisis de correlación sirven para determinar la intensidad en la relación entre dos variables. La mayoría de las investigaciones en la actualidad incluyen múltiples variables respuesta, y las dependencias entre ellas son a menudo de gran interés. Dos variables son independientes cuando el valor de una no da información sobre el valor de la otra. Para las variables X e Y, la independencia se puede expresar diciendo que la probabilidad de medir cualquiera de los posibles valores de X no se ve afectada por el valor de Y, y viceversa, o usando probabilidad condicional, $P(X|Y) = P(X)$ (Altman & Krzywinski, 2015).

Es importante señalar que la asociación entre variables no debe confundirse con causalidad; si X causa Y, entonces los dos están asociados (dependientes). Sin embargo, pueden surgir asociaciones entre variables en presencia (es decir, X causa Y) y ausencia (es decir, tienen una causa común) de una relación causal, como se ve en el contexto de los análisis de redes bayesianas. Además, cuando se estudian muchas variables en sistemas complejos, pueden surgir asociaciones ficticias, por lo tanto, es importante no perder de vista que la asociación no implica causalidad (Altman & Krzywinski, 2015). En el lenguaje cotidiano, la dependencia, la asociación y la correlación se utilizan indistintamente. Técnicamente, sin embargo, asociación es sinónimo de dependencia y es diferente de correlación. La asociación es una relación muy general: una variable proporciona información sobre otra. La correlación es más específica: dos variables se correlacionan cuando muestran una tendencia creciente o decreciente. Por ejemplo, en una tendencia creciente, observar que $X > \mu_X$ implica que es más probable que $Y > \mu_Y$. Debido a que no todas las asociaciones son correlaciones, y debido a que la causalidad, como se dijo anteriormente, puede conectarse sólo con la asociación, no podemos equiparar la correlación con la causalidad en ninguna de las dos direcciones (Altman & Krzywinski, 2015). Dado que una correlación expresa el grado de asociación entre dos variables, ésta se puede clasificar según el sentido de la relación en:

- Lineal o curvilínea, según la nube de puntos se condense en torno a una línea recta o a una curva.
- Positiva o directa, cuando al aumentar una variable aumenta la otra y viceversa.
- Negativa o inversa, cuando al crecer una variable, la otra decrece y viceversa.
- Funcional, si existe una función tal que todos los valores de la nube de puntos la satisfacen.

Cuando no existe ninguna relación y la nube de puntos están distribuidas al azar, se dice que no están correlacionadas (Nula) (Ver Figura 8) (Barrera, 2014).

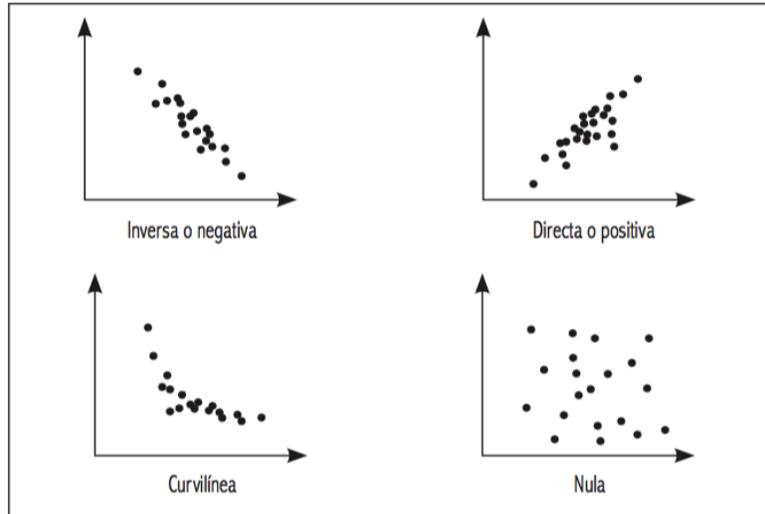


Figura 8. Tipos de correlaciones. Tomada de Barrera, 2014.

Para los datos cuantitativos y ordinales, hay dos medidas primarias de correlación: La correlación de Pearson (r), que mide las tendencias lineales, y la correlación de Spearman (rango) (s), que mide las tendencias crecientes y decrecientes que no son necesariamente lineales. Si se sospecha que existe una relación creciente o decreciente pero no lineal, la correlación que debe ser usada (la más apropiada) es la de Spearman (Altman & Krzywinski, 2015), la cual se describe a continuación.

Coefficiente de correlación por jerarquías de Spearman (Rho de Spearman)

La correlación de Spearman es un método no paramétrico que convierte los datos en rangos (Altman & Krzywinski, 2015). Es una medida de asociación lineal que utiliza los rangos, números de orden, de cada grupo de sujetos y compara dichos rangos (Barrera, 2014). Se puede utilizar cuando X es ordinal y se ha comprobado que es más robusta a los valores atípicos. Tampoco es sensible a las transformaciones monótonas crecientes porque conservan los rangos - por ejemplo, $s(X, Y) = s(X, \log(Y))$ (Altman & Krzywinski, 2015). Éste coeficiente es muy útil cuando el número de pares de sujetos (n) que se desea asociar es pequeño (menor de 30) aunque también funciona para grandes cantidades de datos (Barrera, 2014). Aparte de permitir conocer el grado de asociación entre ambas variables, con Rho de Spearman es posible determinar la dependencia o independencia de dos variables aleatorias (Elorza & Medina Sandoval, 1999). El coeficiente de correlación de Spearman (r_s) (Ecuación 4) se expresa como:

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

n = la cantidad de sujetos que se clasifican; X_i =el rango de sujetos i con respecto a una variable; Y_i = el rango de sujetos i con respecto a una segunda variable; $d_i = X_i - Y_i$, es decir que d_i , es la diferencia entre los rangos de X e Y (Anderson et al., 1999).

La medida no paramétrica r_s , es relativamente robusta para las distribuciones de cola pesada y los valores atípicos; todos los datos se transforman, por lo que la función de influencia está limitada (Croux & Dehon, 2010; De Winter et al., 2016). un gran número de trabajos de investigación han confirmado que r_s tiene propiedades de robustez atractivas (por ejemplo, Bishara & Hittner, 2015; De Winter et al., 2016; Fowler, 1987; Hotelling & Pabst, 1936).

El coeficiente de correlación de rangos de Spearman puede puntuar desde -1.0 hasta +1.0, y se interpreta así: los valores cercanos a +1.0, indican que existe una fuerte asociación entre las clasificaciones, o sea que a medida que aumenta un rango el otro también aumenta; los valores cercanos a -1.0 señalan que hay una fuerte asociación negativa entre las clasificaciones, es decir que, al aumentar un rango, el otro decrece. Cuando el valor es 0.0 se dice que no hay correlación (Anderson et al., 1999). La interpretación de los valores se ha expresado por diversos autores en escalas, siendo una de las más utilizadas la que se presenta en la Tabla 3. Es necesario tener en consideración la significancia del valor de r_s , dada por el valor de p (p value) que lo acompaña. Cuando el valor de p es menor que 0.05, se puede concluir que la correlación es significativa, lo que indica una relación real que no fue debida al azar (Barrera, 2014).

Tabla 3. Grado de relación según coeficiente de correlación de Spearman.

RANGO	RELACIÓN
-0.91 a -1.00	Correlación negativa perfecta
-0.76 a -0.90	Correlación negativa muy fuerte
-0.51 a -0.75	Correlación negativa considerable
-0.11 a -0.50	Correlación negativa media
-0.01 a -0.10	Correlación negativa débil
0.00	No existe correlación
+0.01 a +0.10	Correlación positiva débil
+0.11 a +0.50	Correlación positiva media
+0.51 a +0.75	Correlación positiva considerable
+0.76 a +0.90	Correlación positiva muy fuerte
+0.91 a +1.00	Correlación positiva perfecta

Fuente: Tomada de Barrera, 2014; basada en Hernández Sampieri & Fernández Collado, 1998.

3.3.1.2 Indicadores de Seguridad Alimentaria

- **Acceso a los alimentos**

El acceso a la alimentación está definido como el *“Acceso de las personas a los recursos adecuados (recursos a los que se tiene derecho) para adquirir alimentos apropiados y una alimentación nutritiva”* (FAO, 2006). Estos derechos se definen como el conjunto de todos los grupos de productos sobre los cuales una persona puede tener dominio en virtud de acuerdos jurídicos, políticos, económicos y sociales de la comunidad en que vive, comprendiendo los derechos tradicionales como el acceso a los recursos colectivos (Santos et al., 2014; Frayne & McCordic, 2015). Debido al énfasis económico del índice de marginación en la accesibilidad, la presente investigación incorporó **el inverso del índice de marginación como el índice de acceso a los alimentos** por su

conceptualización en torno a la exclusión social causado por el crecimiento económico y la inequidad (CONAPO, 2012).

Como se mencionó anteriormente, el índice de marginación es calculado por el Consejo Nacional de Población (CONAPO) e integra nueve indicadores asociados a la distribución de la población, condiciones de la vivienda, nivel educativo e ingresos (CONAPO, 2012). La justificación para integrar el índice de marginación como un indicador del acceso a los alimentos se basa en las correlaciones encontradas en los trabajos desarrollados por Ramos Peña et al. (2007), Cuéllar (2011) y Peralta (2016), quienes reportaron que el 80% de las familias en localidades de alta y muy alta marginación están por debajo del nivel de pobreza alimentaria. Aunado a que ha sido históricamente un criterio para delimitar la población objetivo de programas federales en México que buscan incrementar el acceso y la distribución de alimentos (e.g. DICONSA, PESA y PROCAMPO). Para su integración dentro del índice de eficiencia alimentaria y ambiental, se descargaron de la página oficial de la CONAPO los índices de marginación a nivel municipal de los años 1980, 1995, 2000, 2005 y 2010, por ser los intervalos de tiempo más cercanos a los insumos satelitales con los que se basaron las series de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI (ver tabla 2). Una vez descargada la información, se estimó el inverso del índice de vegetación ponderado por la población municipal para cada ecorregión.

- **Disponibilidad de alimentos**

La disponibilidad de los alimentos se define como *el “La existencia de cantidades suficientes de alimentos de calidad adecuada, suministrados a través de la producción del país o de importaciones (comprendida la ayuda alimentaria)”* (FAO, 2006). Una forma de analizar esta dimensión es a partir del concepto de autosuficiencia alimentaria, que se define como *“la medida en que un país puede satisfacer sus necesidades alimentarias con su propia producción nacional”* (FAO, 1999). Esta variable es clave por ser un tema de agenda pública internacional y una meta gubernamental en el estado mexicano desde la década de los setentas (Gómez, 1987) para ahorrar divisas de la compra de otros productos que no pueden ser manufacturados localmente, y de proteger a los países de los vaivenes del comercio internacional y de las fluctuaciones incontrollables de los precios de los productos agrícolas y asegurar el abastecimiento de alimentos para satisfacer las necesidades de las poblaciones locales (Luiselli, 2017; Clapp, 2017).

Una forma de estimar la autosuficiencia alimentaria es a través del balance entre la producción de alimentos versus el consumo aparente de alimentos. La estimación de la autosuficiencia alimentaria en el presente trabajo, se generó para 4 cultivos principales en México: maíz blanco, trigo, arroz y frijol, además del consumo de carne de bovino y ovino. La selección de estos se basó en el hecho de que estos cultivos son los alimentos estratégicos de acuerdo a la ley de desarrollo rural sustentable, y son un eje medular para la focalización de la política agrícola nacional (Diario de la Federación, 2012). Para el cálculo de la producción de alimentos se consideraron las estadísticas de producción anual a nivel municipal que reporta el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), para los años 1980, 1993, 2002, 2007 y 2011, también por ser los intervalos de tiempo más cercanos a los insumos satelitales con los que se construyeron las series de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI (Tabla 2). En el caso del consumo promedio per cápita, se consideraron las constantes reportadas por La Cámara Nacional de la Industria de Transformación en el trabajo reportados por García-Urigüen (2012) (Tabla 4). Para estimar el consumo promedio por ecorregión, se multiplicó el

consumo promedio per cápita de cada uno de los productos por la población reportada por los censos de población y vivienda de INEGI del 2010 (INEGI, 2011).

Tabla 4. Consumo aparente per cápita (kg) en México (García-Urigüen, 2012).

Cultivo/ganado	Año	Consumo anual per cápita (kg.)
Maíz	1980	568.1
	1993	363.4
	2002	241.5
	2007	290
	2011	239
Trigo	1980	53.6
	1993	59.9
	2002	58.8
	2007	57.6
	2011	61.6
Arroz	1980	8
	1993	7.1
	2002	9.18
	2007	10.5
	2011	9.7
Frijol	1980	20.6
	1993	14.5
	2002	16.28
	2007	10
	2011	11.1
Carne de bovino	1980	15.9
	1993	15.5
	2002	19
	2007	18.6
	2011	17.3
Carne de ovino	1980	0.3
	1993	0.5
	2002	0.84
	2007	0.7
	2011	0.8

Finalmente, la autosuficiencia alimentaria se integró en un indicador por cada producto y para cada ecorregión (Ecuación 5) como se muestra a continuación:

$$\text{Indicador de Autosuficiencia Alimentaria} = \left(\frac{\text{Producción} - \text{Consumo}}{\text{Consumo}} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

3.3.1.3 Análisis de los Procesos de Cambio de Uso de Suelo

En las últimas décadas, el número de estudios que abordan las relaciones entre la sociedad y la naturaleza ha incrementado de manera significativa como resultado de un extenso proceso de reconocimiento de la relación entre la actividad antrópica y el deterioro de los ecosistemas, misma que ha derivado en una crisis ambiental global (Quintero-Ángel & González-Acevedo, 2018; Binder

et al., 2013). Los estudios de los procesos de cambio de uso de suelo constituyen un referente importante para el análisis de trayectorias de sistemas socioecológicos así como una dimensión trascendental de la seguridad alimentaria y la dinámica de la frontera agropecuaria, por ser la base para analizar las tendencias de una diversidad de cambios de uso de suelo, como es el caso de la deforestación, degradación y urbanización, estabilidad de los sistemas, entre otros procesos de una región determinada (Lambin et al., 2001). En otras palabras, el cambio de uso del suelo es la expresión dinámica de las actividades humanas sobre un espacio (Platt, 2004). Por ello, entender la dinámica espacio-temporal de la expansión/contracción de las frontera agrícola y pecuaria (vía pastizales inducidos) en relación con el capital natural se vuelve una línea de investigación prioritaria para la agenda nacional. Una importante aproximación para analizar este fenómeno es a través de las representaciones espacio-temporales entendidas como entidades u objetos (e.g. clases de uso de suelo y vegetación) que integran las relaciones topológicas espacio - temporales y su interacción con otras entidades espaciales en un espacio geométrico válido para un intervalo de tiempo (Claramunt & Theriault, 1996); donde los cambios suscitados en dichas entidades se aproximen a las alteraciones de las propiedades de éstas por algún proceso de cambio y permitan entender la evolución de las redes de interacción en la vinculación de estados sucesivos de los objetos y entidades en un respectivo intervalo temporal (Claramunt et al., 1997).

Los procesos de cambio pueden modificar a las entidades espaciales de varias formas, por ejemplo, la existencia misma de la entidad (aparición y desaparición en el espacio-tiempo), su clasificación (e.g. pasar de una parcela agrícola a un lote industrial), los valores de sus atributos temáticos (e.g. cambio de precio de los lotes, variabilidad de los rendimientos agrícolas), los valores de sus atributos espaciales (aspectos geométricos de las entidades), sus relaciones temáticas (cambio de propietario de un predio) y sus relaciones espaciales (e.g. regularización de asentamiento humanos irregulares) (Claramunt & Jiang, 2000; Peuquet, 1999). Para el análisis de procesos de cambio de uso de suelo se procesaron las cinco primeras series de uso de suelo y vegetación de INEGI a escala 1:250,000 (ver cuadro X), y el método fue desarrollado en las 5 fases que se describen a continuación:

Fase 1. Homologación de la información cartográfica: fue derivada del desfase entre los límites nacionales y cuerpos costeros entre las cinco series de INEGI consideradas, y de las diferencias respecto al sistema de referencia espacial. La homologación se realizó respecto a los límites de la Serie V a partir de la cual se estandarizaron todas las series anteriores a esa a un sistema de coordenadas geográficas con un modelo geodésico basado en los datum y elipsoide WGS84.

Fase 2. Reagrupación de las clases de uso de suelo y vegetación: para homologar las 70 clases de uso de suelo y vegetación entre las series de INEGI y facilitar su análisis, se realizó una reclasificación en 29 clases (ver Anexo - Tabla 1), considerando los distintos estadios sucesionales de la vegetación (primaria y secundaria), con base en la reagrupación propuesta por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (Pérez et al., 2013) con algunas modificaciones semánticas propuestas en colaboración con el CentroGeo.

Fase 3. Rasterización y superposición espacial o cruce de mapas: una vez homologadas y reagrupadas las clases se procedió a convertir en raster las capas reagrupadas a un tamaño de celda o resolución espacial de 125 metros, para posteriormente realizar la fusión o unión geométrica de las entidades espaciales entre las dos series según la propuesta de Tobler (1987) a partir de la Ecuación 6:

$$\text{Resolución espacial promedio} = \left(\frac{\text{denominador de la escala}^{1/2}}{1,000} \right) \quad (\text{Ec. 6})$$

Fase 4. Vectorización y generalización cartográfica: el resultado del cruce de mapas fue vectorizado para resolver la atomización de la superposición espacial, generada principalmente por el efecto de borde derivado de la fusión entre series; posteriormente se realizó una generalización cartográfica por área mínima cartografiada de 25 hectáreas tomando los criterios establecidos por INEGI y retomados por Rosete-Vergés et al., 2014.

Fase 5. Análisis de las trayectorias y agrupación de los procesos y subprocesos de cambio: resultante de la fusión emergieron 29x29 posibles procesos de cambio (un total de 841), esto llevó a un análisis semántico de las topologías espacio-temporales para reagrupar las combinaciones derivadas en 7 procesos de cambio: Cambios entre sistemas productivos, Expansión de sistemas productivos a costa de vegetación, Contracción de los sistemas productivos a favor de vegetación, Degradación, Permanencia, Expansión de asentamientos humanos y Otros procesos/Posibles errores de interpretación. Tras la segmentación, se obtuvieron 34 subprocesos (e.g. expansión de actividades productivas agrícolas a costa de bosques secundarios).

3.3.1.4 Análisis de Tendencias a partir del Método de Correlación de Spearman

Para conocer el potencial de asociación entre las tendencias de las variables predictoras de seguridad alimentaria y los procesos de cambio de uso de suelo, se realizó un análisis de correlación de Spearman (ver sección 2.3.1). Los coeficientes de correlación se obtuvieron a partir de la asociación entre los vectores de cambio entre fechas de los indicadores de seguridad alimentaria (e.g. 1980-1995 para el caso del acceso a los alimentos) respecto al vector de cambio (e.g. expansión agrícola entre la Serie I y la Serie II).

3.3.1.5 Construcción de Índices de Eficiencia Alimentaria y Ambiental

A partir del análisis de tendencias se construyó una matriz de correlaciones y sus respectivas significancias estadísticas entre los indicadores de seguridad alimentaria y los procesos de cambio; se plantearon los índices de eficiencia alimentaria y ambiental según el proceso de expansión agrícola ($EAA_{\text{exp_agri}}$) y pecuaria ($EAA_{\text{exp_pec}}$). La expresión matemática de cada uno se desarrolla mediante la construcción de índices compuestos de relaciones aritméticas, según un conjunto de reglas o criterios de decisión asociados a los niveles de correlación y de tendencia positiva o negativa de la asociación (Ecuación 7-8)

$$EAA_{\text{exp_agri}} = \sum f_{\text{acceso}} + IAA_{\text{maíz}} + IAA_{\text{frijol}} + \dots + IAA_n \quad (\text{Ec. 7})$$

$$EAA_{\text{exp_pec}} = \sum f_{\text{acceso}} + IAA_{\text{maíz}} + IAA_{\text{frijol}} + \dots + IAA_n \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

$EAA_{\text{exp_agri}}$: Índice de eficiencia alimentaria y ambiental en relación con la expansión agrícola.

$EAA_{\text{exp_pec}}$: Índice de eficiencia alimentaria y ambiental en relación con la expansión pecuaria.

f_{acceso} : Acceso a los alimentos.

IAA = Índice de autosuficiencia alimentaria según el tipo de producto.

Las reglas o criterios de decisión se plantearon en función de si durante los 35 años (1976-2011) de análisis para cada ecorregión ocurrió un avance en seguridad alimentaria, si esto correspondió a una mayor expansión de los sistemas de producción extensivos, y si los incrementos o decrementos en la seguridad alimentaria (acceso a los alimentos, autosuficiencia alimentaria o ambos) se asocian con los impactos ambientales (procesos de cambio). Lo anterior bajo el planteamiento de si un aumento en la seguridad alimentaria justifica el impacto ambiental o si el incremento de la frontera agropecuaria ha propiciado un incremento en la seguridad alimentaria nacional. A continuación, se ilustran los criterios:

- a) Incremento de 1, cuando la correlación es estadísticamente significativa, la tendencia de los predictores de seguridad alimentaria es positiva y el coeficiente de correlación es negativo.
- b) Incremento de 0.5, cuando la correlación es estadísticamente significativa, la tendencia de los predictores de seguridad alimentaria es positiva y el coeficiente de correlación es positivo.
- c) Sin cambio, cuando la correlación no es estadísticamente significativa.
- d) Decremento de 0.5, cuando la correlación es estadísticamente significativa, la tendencia de los predictores de seguridad alimentaria es negativa y el coeficiente de correlación es positivo.
- e) Decremento de 1, cuando la correlación es estadísticamente significativa, la tendencia de los predictores de seguridad alimentaria es positiva y el coeficiente de correlación es positivo.

Siendo, una correlación estadísticamente significativa a partir del binomio en el que el coeficiente de Spearman sea mayor a 0.6 y el valor de p inferior a 0.05. Mientras que la tendencia es la representación de la pendiente bajo un modelo lineal de la variable a través del tiempo.

3.3.2 Modelo de Ecuaciones Estructurales de la Seguridad Alimentaria Rural en México

Para la construcción del modelo de ecuaciones estructurales de la seguridad alimentaria rural primero se calcularon una serie de variables de la estructura del sistema agrícola nacional (Figura 9).

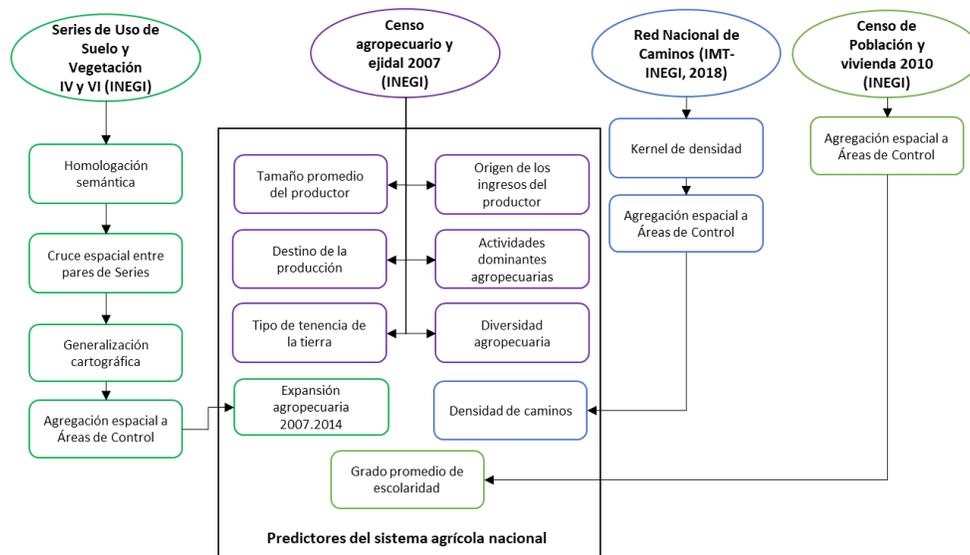


Figura 9. Diagrama metodológico general de la construcción de las variables usadas en el modelo de ecuaciones estructurales usado para calcular la seguridad alimentaria rural nacional y por ecorregiones.

Posteriormente se generaron los indicadores de seguridad alimentaria basados en la disponibilidad de alimentos, acceso a los alimentos y uso de los alimentos. Luego, se generó el modelo conceptual de seguridad alimentaria rural a partir de un análisis de modelo de ecuaciones estructurales, a nivel nacional y por ecorregiones. Por último, se estimaron una serie de parámetros estadísticos para evaluar los ajustes de los modelos conceptuales resultantes (Figura 10).

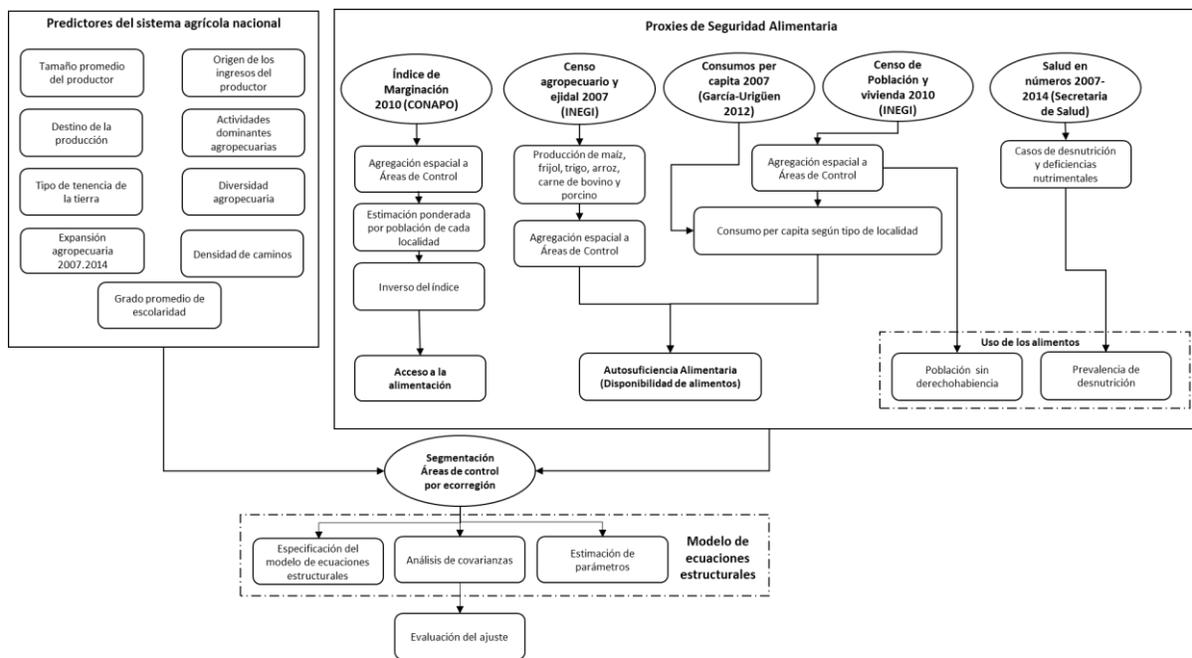


Figura 10. Diagrama metodológico general del modelo de ecuaciones estructurales usado para calcular la seguridad alimentaria rural nacional y por ecorregiones.

3.3.2.1 Marco Metodológico asociado a los Modelo de Ecuaciones Estructurales (MES)

La comprensión desde perspectivas sistémicas, por ejemplo, del sistema alimentario, requiere la capacidad de examinar simultáneamente influencias y respuestas. Los análisis univariados y bivariados convencionales, también llamados técnicas de primera generación, se limitan típicamente a examinar de un solo, o como mucho, un par de procesos a la vez. Por ello y para superar las debilidades de los métodos de primera generación, durante los últimos 20 años muchos investigadores han recurrido cada vez más a técnicas de segunda generación (Hair et al., 2016). Dentro de las técnicas de segunda generación se destacan los modelos de ecuaciones estructurales (MES), que constituyen una herramienta estadística multivariada, también conocida como análisis de estructura de covarianzas, que permite probar la relación (no necesariamente la causalidad) que hay entre variables (Kline, 2015).

Los MES combinan el análisis factorial con la regresión lineal para probar el grado de ajuste de datos observados a un modelo hipotético que es expresado mediante un diagrama o mapa mental (Hair et al., 2016). Un MES no comienza necesariamente con una hipótesis nula a la que se da prioridad; por el contrario, los MES normalmente se basan en el conjunto del conocimiento disponible. Las herramientas informáticas para realizar los MES requieren que el investigador proporcione mucha

información sobre cosas tales como qué variables se supone que afectan a otras variables y las direccionalidades de estos efectos. Estas especificaciones a priori reflejan las “hipótesis” y en total constituyen el modelo a analizar (Raykov & Marcoulides, 2012). En ese sentido, el MES puede ser visto como confirmatorio, es decir, el modelo representado en un mapa mental es un hecho al principio del análisis, y una de las principales preguntas a responder es si está respaldado por los datos (Kline, 2015).

Como sucede a menudo, los datos pueden ser inconsistentes con el modelo, lo que significa que el modelo debe ser abandonado o se deben modificar las hipótesis (relaciones) en las que se basa. Cuando un modelo inicial no se ajusta a los datos y se opta por modificar y probar con los mismos datos el nuevo modelo alterado, el investigador debe centrar la atención en "descubrir" un modelo que tenga tres propiedades: tenga sentido teórico, sea razonablemente parsimonioso, y su correspondencia con los datos sea aceptablemente cercana (Kline, 2015). A pesar de ser un análisis que evalúa relaciones complejas (multivariadas), no se puede negar que los MES son cada vez más "populares" entre los investigadores de muchas disciplinas diferentes. Esto se ha hecho evidente por el creciente número de herramientas informáticas, cursos formales a nivel de postgrado, talleres de formación continua y artículos en revistas de investigación donde los autores describen los resultados de los análisis de MES (Hair et al., 2016).

Aunque los MES han sido ampliamente usados en investigaciones de psicología, educación y administración/mercadeo (Hanseles, 2017; Hayes et al., 2017; Morin et al., 2016; Olsson et al., 2015; Park, 2019; Scherer et al., 2018), el interés en estos modelos también se ha expandido a otras disciplinas, incluyendo el manejo de vida silvestre (Grace, 2006;2008; Kansky et al., 2016), ciencias de la comunicación (Holbert & Stephenson, 2002; Schivinski & Dabrowski, 2015), investigación médica (DiLalla, 2008), análisis espacial (Belkhiry & Narany, 2015; Ding et al., 2018), Ecología (Jing et al., 2015; Rabbi et al., 2015; Crouch & Mason-Gamer, 2018), y recientemente en disciplinas que abordan problemáticas globales, dentro de las que se destacan estudios en seguridad alimentaria (Calancie et al., 2018; Denny et al., 2018; King, 2018) y cambio climático (Cadez et al., 2019; Li et al., 2018), por nombrar algunas. No es difícil entender este creciente interés por los MES, pues representan tanto una forma diferente de analizar datos, como una forma diferente de hacer ciencia; además de dar flexibilidad a los investigadores al permitirles adaptar el análisis en función de los objetivos a conseguir (Kline, 2015).

- **Características principales del MES**

Hay dos amplias clases de variables en los MES: observadas y latentes. **Las variables observadas** representan los datos, es decir, las variables para las que se han recopilado las mediciones y se han introducido en una base de datos (se representan mediante rectángulos en el diagrama que expresa al MES); pueden ser categóricas, ordinales o continuas. Las **variables latentes** en el MES generalmente corresponden a constructos o factores hipotéticos, son variables que se supone reflejan un continuo que no es directamente observable (Kline, 2015). Es decir, son variables que representan fenómenos abstractos, complejo y no directamente observable, pero que se manifiestan a través de variables observables llamadas indicadoras (se representan mediante elipses en el mapa mental) (Carifio & Perla, 2007); en un MES las variables latentes siempre son consideradas como variables continuas, aunque existen otras técnicas estadísticas para analizar modelos con variables latentes categóricas (Kline, 2015). Los MES no necesariamente deben tener variables latentes, la evaluación de los modelos que se refieren a los efectos sólo entre variables

observadas es posible en MES, estos usan la técnica de análisis de trayectoria, un miembro de la familia de los MES. Las variables que reciben el efecto de otras variables se denominan **endógenas**, mientras que las que no sienten el efecto de otras variables son **exógenas** (Carifio & Perla, 2007). La estadística básica del MES es la covarianza, que se define para dos variables continuas observadas X e Y (Ecuación 9).

$$COV_{xy} = r_{xy}SD_xSD_y \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde r_{XY} es la correlación de Pearson y SD_x y SD_y son sus desviaciones estándar.

La covarianza representa la fuerza de la asociación entre X e Y y sus variabilidades. Decir que la covarianza es el estadístico básico del MES significa que el análisis tiene dos objetivos principales: (1) comprender los patrones de covarianza entre un conjunto de variables observadas y (2) explicar la mayor parte de la varianza como sea posible con el modelo del investigador (Kline, 2015).

Se ha intentado adaptar las técnicas de los MES para acomodar tamaños de muestra más pequeños (por ejemplo, Nevitt & Hancock, 2004), pero en general sigue siendo cierto que el MES es una técnica de muestra grande pues algunos tipos de estimaciones estadísticas en el modelo, como los errores estándar, pueden no ser precisos cuando el tamaño de la muestra no es grande; también es mayor la probabilidad de que se produzcan problemas técnicos en el análisis. Pero ¿Qué es un tamaño de muestra "suficientemente grande" para un MES? Para responder esta pregunta Jackson (2003) se refirió a una útil regla empírica sobre la relación entre el tamaño de la muestra y la complejidad del modelo que también tiene cierto apoyo empírico como la regla N:q (N: tamaño mínimo de la muestra en términos de la proporción de casos; q: número de parámetros del modelo que requieren estimaciones estadísticas). Esta regla es aplicable cuando el método de estimación utilizado es el de máxima verosimilitud (ML), que es, con mucho, el método más utilizado en el MES y fue el estimador utilizado en este trabajo. También ayuda pensar en el tamaño recomendado de la muestra en términos más absolutos. Un tamaño de muestra "típico" en los estudios en los que se utiliza el MES es de unos 200 casos. Este número corresponde a la mediana aproximada del tamaño de la muestra en las encuestas de artículos publicados en los que se reportan los resultados del MES (Kline, 2015).

Un gran número de efectos pueden ser probados para determinar el significado estadístico en un MES, desde cosas como la varianza de una sola variable hasta modelos enteros evaluados a través de múltiples muestras. Sin embargo, hay tres razones por las que los resultados de las pruebas estadísticas pueden ser menos relevantes en el MES que otros tipos de técnicas, incluyendo ANOVA y Regresiones múltiples (RM). La primera razón es que el MES permite la evaluación de modelos completos, lo que aporta una perspectiva de mayor nivel al análisis. Las pruebas estadísticas de los efectos individuales representados en los modelos pueden ser de interés, pero en algún momento se debe tomar una decisión sobre el modelo completo: ¿Debería ser rechazado? ¿modificado? si es así, ¿cómo hacerlo? (Kline, 2015).

Por lo tanto, parte del sentido del MES es que da visión de todo el paisaje (todo el modelo) y dicha visión tiene precedencia sobre la de los detalles específicos (efectos individuales). La segunda razón por la que las pruebas estadísticas juegan un papel menos protagónico en el MES hace referencia al requisito general de grandes tamaños de muestra mencionado anteriormente. Con la mayoría de

las pruebas estadísticas, es posible obtener resultados que son "altamente significativos" (por ejemplo, $p < .0001$) pero triviales en magnitud absoluta cuando el tamaño de la muestra es grande. Del mismo modo, prácticamente todos los efectos que no sean nulos serán estadísticamente significativos en una muestra suficientemente grande (Kline, 2015). Finalmente, la tercera razón radica en que los MES proporcionan mejores estimaciones del tamaño del efecto entre variables (incluso variables latentes) que las técnicas tradicionales usadas para variables observadas (Hair et al., 2016).

- **Fundamentos matemáticos en los MES**

Los coeficientes de regresión no estandarizados B_1 y B_2 indican la diferencia de puntuación bruta esperada en Y , dada la diferencia de un solo punto en un predictor mientras que se controla el otro predictor. La ecuación de regresión no estandarizada para dos predictores (Ecuación 10) se muestra a continuación:

$$\hat{Y} = B_1X_1 + B_2X_2 + A \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde \hat{Y} es una puntuación prevista. El término \hat{Y} es una combinación compuesta, o una combinación lineal ponderada de los dos predictores, X_1 y X_2 . La ecuación tiene una estructura de covarianza y una estructura media. La estructura de covarianza corresponde a los coeficientes de regresión no estandarizados B_1 y B_2 , y la estructura media a la interceptación (constante) A . Los valores de B_1 , B_2 y A se estiman con el método de máxima verosimilitud (ML) que será descrito posteriormente (Kline, 2015).

Debido a que los coeficientes no estandarizados reflejan las escalas de sus respectivos predictores, los valores de B s de predictores con diferentes métricas de puntuación bruta no son directamente comparables. El intercepto A es una constante que iguala el valor de \hat{Y} cuando las puntuaciones en ambos predictores son cero ($X_1 = X_2 = 0$). Puede expresarse en función de los coeficientes no estandarizados y de las medias de todas las variables (Ecuación 11).

$$A = M_Y - B_1M_1 - B_2M_2 \quad (\text{Ec. 11})$$

Por el contrario, las medias no influyen en los valores de los coeficientes de regresión B_1 y B_2 . La ecuación de regresión estandarizada (Ecuación 12) se muestra a continuación:

$$\hat{Z}_y = b_1z_1 + b_2z_2 \quad (\text{Ec. 12})$$

donde z_1 y z_2 son, respectivamente, medidas estandarizadas (desviaciones normales) en X_1 y X_2 , y b_1 y b_2 son, respectivamente, los coeficientes de regresión estandarizados. Estos últimos también se denominan pesos beta porque cada coeficiente estandarizado estima un parámetro de población designado con el símbolo β . Los pesos beta indican la diferencia esperada en el criterio en unidades de desviación estándar, controlando para todos los demás predictores. Además, sus valores pueden ser comparados directamente a través de los predictores (Kline, 2015). Debido a que los coeficientes β estandarizados se ajustan para las intercorrelaciones entre los predictores (y también con el criterio), sus valores absolutos suelen ser inferiores a los de las correlativas correlaciones bivariadas (coeficientes de regresión β no estandarizados). También es posible que los valores

absolutos de los pesos β (coeficiente de regresión β estandarizado) superen 1.0 o incluso que los signos de un peso β y la correlación correspondiente estén en direcciones opuestas (signos invertidos); cuando ocurre cualquiera de estos casos, se indica un efecto de supresión. Para dos predictores, las ecuaciones para sus pesos beta β (coeficientes β estandarizados) (Ecuación 13-14) son:

$$b1 = \frac{r_{y1} - r_{y2}r_{12}}{1 - r_{12}^2} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$b2 = \frac{r_{y2} - r_{y1}r_{12}}{1 - r_{12}^2} \quad (\text{Ec. 14})$$

Los numeradores en la ecuación anterior mantienen constante al otro predictor. En la fórmula para b_1 , por ejemplo, el producto de ambas correlaciones bivariadas que involucran al otro predictor, X_2 , se resta literalmente de la correlación bivariada para X_1 . Los denominadores ajustan la varianza estandarizada total eliminando la proporción compartida por los dos predictores (Kline, 2015).

- **Modelos CFA estándar y Estimador de Máxima verosimilitud**

La técnica del CFA analiza modelos de medición a priori en los que tanto el número de factores como su correspondencia con los indicadores se especifican explícitamente. Los modelos estándar de CFA tienen las siguientes características:

- Cada indicador es una variable continua representada como si tuviera dos causas: un factor único que se supone que el indicador debe medir y todas las demás fuentes únicas de influencia representadas por el término de error.
- Los errores de medición son independientes entre sí y de los factores.
- Todas las asociaciones entre los factores no se analizan (se supone que los factores son covariantes)

Los resultados de un CFA incluyen estimaciones de las varianzas y covarianzas de los factores, la carga de los indicadores en sus respectivos factores y la cantidad de error de medición para cada indicador. Si el modelo del investigador es razonablemente correcto, entonces se debe ver el siguiente patrón de resultados: (1) todos los indicadores especificados para medir un factor común tienen cargas factoriales estandarizadas relativamente altas sobre ese factor (por ejemplo, > 0.70); y (2) las correlaciones estimadas entre los factores no son excesivamente altas (por ejemplo, < 0.90 en valor absoluto). El primer resultado indica validez convergente; el segundo, validez discriminante (Hair et al., 2016).

El método de estimación de máxima verosimilitud (ML, por sus siglas en inglés) es el predeterminado en la mayoría de los programas informáticos de SEM, y la mayoría de los modelos de ecuaciones estructurales descritos en la literatura se analizan con este método. De hecho, el uso de un método de estimación distinto del ML requiere una justificación explícita (Hoyle, 2000). El término máxima verosimilitud describe el principio estadístico que subyace en la derivación de las estimaciones de los parámetros; las estimaciones son las que maximizan la verosimilitud (la generalización continua) de que los datos (las covarianzas observadas) fueron extraídos de una población de datos. Es un

método teórico normal porque se asume la normalidad multivariada para las distribuciones de la población de las variables endógenas (Hair et al., 2016).

La mayoría de las formas de estimación del ML en el SEM son simultáneas, lo que significa que las estimaciones de los parámetros del modelo se calculan de una sola vez. Por lo tanto, la estimación ML es un método de información completa. Cuando se cumplen todos los requisitos estadísticos y se especifica correctamente el modelo, los estimadores ML en muestras grandes son asintóticamente imparciales, eficientes y consistentes. En este sentido, la estimación de ML tiene una ventaja bajo estas condiciones ideales sobre los métodos de información parcial que analizan sólo una ecuación a la vez. El criterio minimizado en el estimador ML, o la función de ajuste (Función fit), está relacionada con la discrepancia entre las covarianzas de la muestra y las predicciones del modelo del investigador (Kline, 2015).

Las implementaciones informáticas del estimador ML son típicamente iterativas, lo que significa que la computadora deriva una solución inicial y luego intenta mejorar estas estimaciones a través de ciclos subsiguientes de cálculos. "Mejora" significa que el ajuste general del modelo a los datos mejora gradualmente. Para la mayoría de los modelos recién identificados, el ajuste será perfecto. Para los modelos sobreidentificados, el ajuste del modelo a los datos puede ser imperfecto, pero la estimación iterativa continuará hasta que las mejoras en el ajuste del modelo caigan por debajo de un valor mínimo pre-definido. Cuando esto sucede, el proceso de estimación ha convergido. La estimación iterativa puede converger a una solución más rápidamente si el procedimiento recibe valores iniciales razonablemente precisos, o estimaciones iniciales de los parámetros (Hair et al., 2016)

La interpretación de los parámetros estimados con ML para los modelos de trayectoria es:

- Los coeficientes de trayectoria se interpretan como coeficientes de regresión en ML. Esto es cierto tanto para la solución no estandarizada como para la estandarizada.
- Las variaciones de las perturbaciones en la solución no estandarizada se estiman en la métrica de la varianza no explicada de la variable endógena correspondiente.
- En la solución estandarizada, las varianzas de todas las variables (incluyendo las perturbaciones) son iguales a 1.0.

3.3.2.2 Unidad de Análisis: áreas de control

La unidad de análisis empleada para realizar el modelo de ecuaciones estructurales se basa en las denominadas Áreas de Control (AC) propuestas por INEGI, las cuales son la unidad mínima de representación o agregación espacial dentro del marco geoestadístico nacional. Las AC presentan una superficie promedio de 1,000 hectáreas y se definen como *“cada una de las partes en que se subdividen las Áreas Geostadísticas Básicas (AGEB) Rurales, con la finalidad de contar con un mayor nivel de detalle que permita ubicar los terrenos sobre los cuales se obtiene información estadística; su superficie está delimitada por rasgos físicos y culturales reconocibles en campo y cuenta en su interior con uno o más terrenos de un mismo tipo de tenencia”* (INEGI, página web). Cabe destacar que ésta segmentación del territorio, sólo da cuenta de la dinámica de paisaje rural. Las AC han sido utilizadas como unidad mínima de información en el censo agropecuario y ejidal (INEGI, 2011) así como en el marco de actualización (INEGI, 2016). Ambas fuentes de información cuentan con una vasta riqueza de datos relacionados con la producción y productividad de los principales cultivos del

país, así como con diferentes características de las prácticas agrícolas, destinos de la producción y variables socioeconómicas de las unidades de producción asociadas distribuidas en 178,083 polígonos para todo el país.

3.3.2.3 Variables Predictoras asociadas al Sistema Agrícola

Existen diferentes formas de clasificar la estructura del sistema agrícola, algunas de ellas pueden estar en función de sus principales componentes físicos, bióticos, económicos y socioculturales (FAO, 2018; Spedding, 2012). Se han llevado a cabo una serie de trabajos dentro de los que se contemplan estos factores de forma aislada en el papel de la seguridad alimentaria. Ejemplos de variables que se consideran como parte del sistema agrícola son el tamaño de la unidad de producción, el destino de la producción, el origen de los ingresos, el uso de la tierra, el tipo y la diversidad de cultivos, gestión del agua, tipo de tenencia de la tierra, accesibilidad e infraestructura vial (FAO, 2018; Altieri et al., 2012; Koohafkan et al., 2012), y por ello fueron contempladas como variables predictoras para el análisis a través del modelo de ecuaciones estructurales. A continuación, se detalla en la construcción metodológica de éstas.

- **Tamaño de la unidad de producción.** Con base en la propuesta de clasificación de Samberg (2016), se calculó el promedio del tamaño de la unidad de producción en cada área de control (superficie total agropecuaria / total de unidades de producción), para posteriormente clasificar las áreas de control en las 6 categorías que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Categorías del tamaño de unidad de producción propuestas por Samberg (2016).

Tamaño	Categoría
< 2 ha	Muy pequeño
2 – 5 ha	Pequeño
5 – 15 ha	Mediano
15-50 ha	Grande
> 50 ha	Muy grande
> 15 ha, >90% pastizal inducido o cultivado	Pastoreo extensivo

- **Destino de la producción.** A partir de la propuesta conceptual de FAO-SAGARPA (2012), se agruparon las áreas de control en función del porcentaje dominante del destino de la producción y los canales de comercialización en los 4 estratos que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Categorías del destino de la producción.

Categoría	Definición	Método
Subsistencia	Es aquella orientada exclusivamente al autoconsumo, con disponibilidad de tierras e ingresos insuficientes para garantizar la reproducción económica, lo que induce al productor a recurrir al trabajo asalariado, rentar parte de la superficie disponible y depender en gran medida de apoyos gubernamentales.	Áreas de control donde más del 50% de unidades de producción destinan la producción al consumo familiar y de los animales.
Empresarial de base familiar	La producción se destina a la venta y autoconsumo, cuenta con mayor superficie que el grupo anterior y diversificación de actividades primarias; sin embargo, presenta dificultades para generar ingresos y producción suficiente para la reproducción familiar, así como para lograr una mayor eficiencia de articulación a los mercados.	Áreas de control donde más del 50% de las unidades de producción venden parte de su producción y más del 50% de la comercialización se llevó a cabo mediante canales incipientes (intermediarios y mayoristas).
Empresarial	El productor tiene sustento suficiente en la producción propia y acceso a mercados locales, debido a los apoyos gubernamentales y a otras fuentes de ingreso que también perciben.	Áreas de control donde más del 50% de las unidades de producción venden su producción y > 50% de la comercialización se llevó a cabo mediante canales consolidados (agroindustrias, cadenas comerciales).
Mixtas	Propuesta en la presente investigación en la que se mezclan las características de los productores de las categorías de subsistencia y empresarial de base familiar.	Áreas de control donde la relación entre las unidades de producción de subsistencia y las unidades de producción empresarial de base familiar presentan el 50% cada una en el área de control.

Fuente: Propuesta modificada por FAO-SAGARPA (2012).

- **Origen de los ingresos:** esta variable se construyó considerando la propuesta conceptual de Schneider (2014), en la que las unidades de producción se segmentan en dos clases en función del origen de los ingresos (Tabla 7).

Tabla 7. Categorías del origen de los ingresos.

Categoría	Definición	Método
Especializada	Es aquella unidad de producción en la que se obtiene el 50% o más de los ingreso bruto total de las actividades agropecuarias y forestales.	Aquellas áreas de control donde el 50% o más reportaron que su fuente de ingresos proviene de la labor agropecuaria.

Pluriactiva	Cuando en la unidad de producción el 50% o más de los ingresos provienen de actividades ajenas a la labor agropecuaria.	Aquellas áreas de control donde el 50% o más reportaron que su fuente de ingresos proviene de programas asistenciales, remesas y otras actividades no agropecuarias.
Mixtas	Propuesta en la presente investigación en la que se mezclan las características del destino de la producción especializada y pluriactiva.	Aquellas áreas de control donde se presenta el 50% del destino de la producción especializada y 50% pluriactiva.

Fuente: Propuesta modificada por FIDA-RIMISP (2014).

- **Actividad predominante.** Es la identificación entre las actividades dominantes realizadas en el área de control (e.g. agricultura de temporal, agricultura de riego, pastizales cultivados e inducidos, y las combinaciones de las mismas) con base en la agregación espacial de las superficies de Uso de Suelo y Vegetación reportadas en la Serie IV (2007) de INEGI. La selección de dicha serie se encuentra asociada a que los demás datos provenientes del Censo agropecuario y ejidal son registros del 2007.

Cabe destacar que las variables de tamaño de la unidad de producción, destino de la producción, origen de los ingresos y actividad dominante se usarán como proxies de índices de pequeño productor, subsistencia, diversificación económica de los productores y agricultura de temporal, respectivamente en la sección de resultados.

- **Tenencia de la tierra.** Esta variable se construyó como la razón entre cada una de las superficies de los tipos de tenencia de la tierra: Ejidal, Comunal y Privada reportadas en el Censo agropecuario y ejidal de INEGI (2007) entre la superficie total del área de control.
- **Diversidad de cultivos (entropía).** Una forma de analizar la diversidad de cultivos es través de índices de diversidad o entropía (Herrero et al., 2017). Para la estimación de la diversidad de cultivos en las áreas de control se empleó la fórmula de Shannon & Weaver (1949) (Ecuación 15).

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i)(\log_2 P_i) \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

S: Número de cultivos reportados por el censo agropecuario y ejidal de INEGI (2007), que, de acuerdo al ciclo agrícola, puede reportar un número máximo de 24 cultivos para los ciclos Primavera-Verano y Otoño-Invierno, mientras que en el caso de los cultivos perennes puede reportar hasta 131 cultivos. Pi: Proporción de los cultivos (superficies) respecto a la superficie total del área de control.

- **Expansión agropecuaria 2007-2014.** Para el análisis de procesos de cambio de uso de suelo se procesó la Serie IV (2007) y la Serie VI (2014) de Uso de Suelo y Vegetación a escala 1:250000. El método se dividió en seis fases como se abordó en la sección 2.3.1.3. Con la incorporación de una fase 6 asociada a la agregación espacial de la expansión agropecuaria: Derivado del análisis de trayectorias, se filtraron los procesos de cambio asociados a la expansión de la frontera agrícola y pecuaria, para posteriormente hacer una agregación espacial de las superficies obtenidas para cada una de las áreas de control donde se observaron dichas dinámicas.
- **Presencia de cobertura vegetal.** El capital natural se define “*como el conjunto de ecosistemas, tanto los naturales como los manejados por la humanidad, que generan bienes y servicios y son perpetuables ya sea por sí mismos o por el manejo humano*” (Sarukhan et al., 2009). Para integrar en el modelo de ecuaciones estructurales una aproximación de capital natural, se agregaron en las áreas de control las superficies de todos los tipos de vegetación reportados en la Serie de Uso de Suelo y Vegetación IV (2007) dada la concordancia con las demás variables predictoras derivadas del Censo agropecuario y ejidal.
- **Densidad de caminos.** La estimación de densidad de caminos se llevó a cabo mediante el método de kernels de densidad aplicado a la red nacional de caminos del Instituto Mexicano del Transporte (2018). El método se sustenta en el cociente entre dos tipos de valores: la del fenómeno a estudiar (representado por las geometrías asociadas) y una superficie de referencia (km², Ha, entre otras). El Kernel genera una superficie curva sobre cada geometría en estudio, usando cálculos de vecindad focal definida por bloques de celdas o píxeles y una función simétrica radial. La expresión matemática del cálculo de la densidad de caminos se muestra en la Ecuación 16.

$$L_j = \frac{\sum X_i}{\pi * r^2} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

L_j= Densidad en el pixel j

X_i= Variable

r= Radio de búsqueda

La aplicación del método sólo consideró las geometrías vinculadas a las carreteras y caminos rurales, lo referente a la traza urbana fue descartada y el radio de búsqueda se acotó a 1 km² para el modelo nacional. Posteriormente, a partir de estadísticas zonales se agregaron las isodensidades en las áreas de control.

- **Grado de escolaridad.** El grado de escolaridad se obtuvo del censo de población y vivienda de INEGI (2011) a nivel de localidad, para su agregación en áreas de control se calculó un promedio ponderado por la población total.

A modo de resumen, en la Tabla 8 se muestra la información asociada a las variables predictoras usadas dentro de los modelos de ecuaciones estructurales.

3.3.2.4 Variables Predictoras asociadas a Seguridad Alimentaria

- **Acceso a los alimentos**

El acceso a los alimentos se desarrolló empleando el inverso del índice de marginación del 2010, y fue denominado índice de acceso a los alimentos, se encuentra a nivel localidad y agregado a nivel de áreas de control mediante el inverso del índice de vegetación ponderado por la población.

- **Disponibilidad de alimentos**

La disponibilidad de alimentos se tomó del indicador de autosuficiencia alimentaria construido como se mencionó anteriormente, pero esta vez a nivel de área de control e incluyendo los siguientes ajustes:

- ✓ Se integró la información de producción y consumo aparente de porcinos, en vez de la producción de ovinos. Los demás productos fueron los mismos.
- ✓ La información de producción fue provista por el censo agropecuario y ejidal de INEGI (2007), mientras que para el consumo promedio per cápita, se consideraron las constantes según tamaño de la localidad reportadas por la Cámara Nacional de la Industria de Transformación reportadas por García-Uribe (2012) (Tabla 9). Para estimar el consumo promedio por área de control, se multiplicó el consumo promedio per cápita de cada uno de los productos por la población reportada por el censo de población y vivienda de INEGI (2010) a nivel de localidad.

Tabla 8. Variables predictoras usadas en los modelos de ecuaciones estructurales.

Variable	Esquema de clasificación	Autores	Fuente(s)
Tamaño de la Unidad de producción como un proxy de un índice de pequeña agricultura	Muy pequeño (< 2 ha); Pequeño (2-5 ha); Mediano (5-15 ha); Grande (15-50 ha); Muy Grande (>15ha, >90% pastizal extensivo).	Samberg et al. (2016)	Censo agropecuario y ejidal 2007 de INEGI
Destino de la producción como proxy de un índice de subsistencia	Subsistencia Comercial de base familiar Empresarial Mixtas	Gómez Oliver (2017) & FAO-SAGARPA (2012)	Censo agropecuario y ejidal 2007 de INEGI
Actividad predominante como proxy de un índice de agricultura de temporal	Pastizales inducidos y cultivos Agricultura de riego Mixtos (agricultura de riego y temporal) Agricultura de temporal	INEGI	Serie de uso de Suelo y Vegetación IV de INEGI
Origen de los ingresos como proxy de un índice de diversificación económica	Especializado Mixto Pluriactivos	FIDA-RIMISP (2014)	Censo agropecuario y ejidal 2007 de INEGI
Tenencia de la tierra ejidal	Rango de 0 – 1 (estandarizado)	INEGI	Censo agropecuario y ejidal 2007 de INEGI
Tenencia de la tierra comunal	Rango de 0 – 1 (estandarizado)	INEGI	Censo agropecuario y ejidal 2007 de INEGI
Tenencia de la tierra privada	Rango de 0 – 1 (estandarizado)	INEGI	Censo agropecuario y ejidal 2007 de INEGI
Diversidad de cultivos	Rango de 0 – 1 (estandarizado)	Herrero et al., 2017	Censo agropecuario y ejidal 2007 de INEGI
Expansión agropecuaria	Rango de 0 – 1 (estandarizado)	INEGI	Serie de uso de Suelo y Vegetación IV y VI de INEGI
Presencia de vegetación natural	Rango de 0 – 1 (estandarizado)	INEGI	Serie de uso de Suelo y Vegetación IV de INEGI
Grado de escolaridad	Rango de 0 – 1 (estandarizado)	INEGI	Censo de población y vivienda 2010 de INEGI
Densidad de caminos	Rango de 0 – 1 (estandarizado)	Instituto Mexicano del Transporte-INEGI	Red nacional de caminos 2018

Tabla 9. Consumo aparente per cápita (kg) basado en el tamaño de la localidad en México (2012).

Cultivo/ganado	< 2,500 habitantes	2,500 to 14,999 habitantes	15,000 to 99,999 habitantes	100,000 o más habitantes
Maíz	85.48	85.41	70.84	54.02
Trigo	13.17	14.85	14.92	16.49
Arroz	5.07	4.85	4.05	3.54
Frijol	11.24	9.85	8.10	5.43
Bovino	5.11	7.88	9.30	10.43
Porcino	4.96	7.66	8.32	8.10

- **Uso de los alimentos**

Esta dimensión fue integrada por dos variables, el acceso a derechohabencia y la prevalencia de casos de desnutrición y de deficiencias nutrimentales. En el caso del derechohabencia, fue incluido considerando que los servicios de salud y su acceso contribuyen a mejorar el bienestar nutricional a través del acceso a vacunas, servicios terapéuticos, rehidratación oral, entre otros; además, por el fortalecimiento asociado a promover de manera más efectiva la lactancia materna, atención a niños y personas de la tercera edad, asistencia al parto, asesoramiento nutricional y el apoyo a estrategias apropiadas para la prevención de deficiencias de micronutrientes (Pedraza, 2005). La información asociada a la población con derechohabencia se descargó del censo de población y vivienda de 2010 (INEGI, 2011) a nivel localidad, y se realizó la agregación espacial a nivel de área de control para estimar el porcentaje de población sin derechohabencia en cada registro.

La desnutrición y las deficiencias nutricionales fueron agrupadas en una misma variable por representar la inseguridad alimentaria y explicar el estado nutricional de una población (Denny et al., 2018), con énfasis en la ocurrencia dentro de grupos vulnerables y áreas rurales; además de haber sido ampliamente documentado el papel de la desnutrición como una medida de hambre o inseguridad alimentaria (Myers et al., 2017; De Haenet al., 2011). La información para la construcción de esta variable contemplo un intervalo de tiempo de diez años (2007-2017) y fue descargada de la Dirección General de Información en Salud (<http://www.dgis.salud.gob.mx>) en donde son reportadas las estadísticas nacionales de la Secretaría de Salud que reportan todos los registros de morbilidad del país a nivel de localidad y la respectiva causa asociada por año. Tras la espacialización de la dicha información, para estimar la prevalencia de casos se realizó una agregación a nivel del área de control considerando la población total respectiva. Solo se consideró la desnutrición y no la malnutrición (por ejemplo, la obesidad), por la complejidad que representaba modelar relaciones basadas en la estructura del sistema agrícola nacional.

3.3.2.5 Construcción del Modelo de Ecuaciones Estructurales

Los diagramas de modelos se representan en este trabajo utilizando los símbolos del modelo de acción reticular (RAM por sus siglas en inglés) propuesto por McArdle-McDonald. El simbolismo RAM representa explícitamente cada parámetro del modelo. Esta propiedad tiene un valor pedagógico para el aprendizaje de los MES. También ayuda a evitar errores al momento de traducir un diagrama a la sintaxis de una herramienta informática en particular. El simbolismo RAM es universal en los MES, esto incluye la representación en diagramas de:

- Variables observadas con cuadrados o rectángulos, por ejemplo: 
- Variables latentes con círculos o elipses, por ejemplo: 
- Efectos direccionales hipotéticos de una variable sobre otra, o efectos directos, con una línea con una sola punta de flecha, por ejemplo: 
- Covarianzas (en la solución no estandarizada) o correlaciones (en la estandarizada) entre variables independientes - referidas en el MES como variables exógenas- con una línea curva con dos puntas de flecha: 

La aplicación de modelo de ecuaciones estructurales se dividió en 4 fases: a) La especificación del modelo, b) la identificación de los parámetros del modelo según las covarianzas; c) la estimación de los parámetros y, d) la medición del ajuste del modelo. La especificación del modelo se inició estableciendo las relaciones hipotéticas entre las variables observadas (asociadas a la estructura del sistema agrícola y a seguridad alimentaria) y la variable latente (seguridad alimentaria rural). Dichas relaciones fueron esquematizadas en un mapa mental (Figura 11), y evaluadas a través del modelo de ecuaciones estructurales, con el que se obtuvieron los valores de significancia y la magnitud de cada relación.

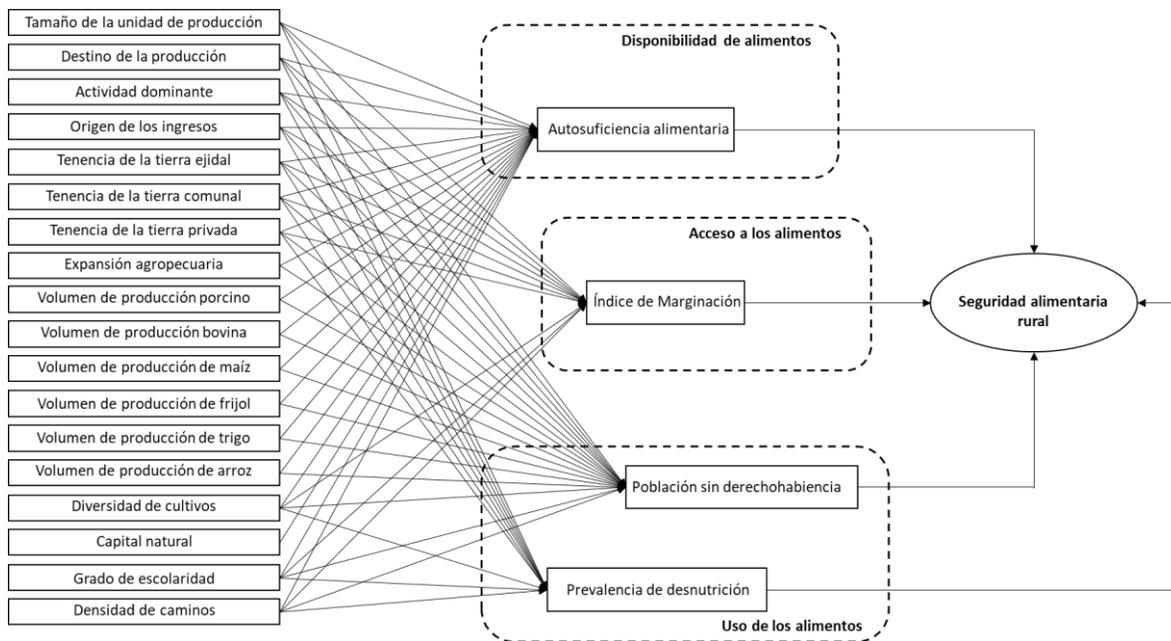


Figura 11. Mapa mental esquematizando las relaciones evaluadas en el modelo de ecuaciones estructurales. Los rectángulos contienen las variables observadas, el ovalo la variable latente y los cuadros con líneas discontinuas representan las tres dimensiones de seguridad alimentaria que fueron integradas.

Las relaciones fueron evaluadas a nivel nacional y a nivel de ecorregiones, para identificar el poder de explicación y de patrones de la estructura del sistema agrícola a través de diferentes niveles de agregación. Para la identificación de los parámetros del modelo se estimaron las covarianzas (Ec. 9)

La estimación de los coeficientes estandarizados y no estandarizados se realizó a través del método de máxima verosimilitud (ML), bajo el supuesto de obtener estimaciones con base en la disminución de una función de ajuste mediante las discrepancias entre las matrices de varianzas y covarianzas observadas y estimadas (Aráuz, 2015). La función de ajuste se muestra en la Ecuación 17.

$$ML = \ln|S| - \ln|\Sigma| + tr|(S)(\Sigma - 1)| - p \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

ML: Máxima verosimilitud (estimador).

|S| = Determinante de la matriz de varianzas y covarianzas observadas.

|\Sigma| = Determinante de la matriz de varianzas y covarianzas estimadas.

p = Orden de la matriz de entrada (número de variables manifiestas).

tr = Expresión para representar al operador de la traza de una matriz.

El tamaño de la muestra empleada se delimitó a todas aquellas áreas de control que contenían población rural en México (n= 68,323 registros) y su respectiva segmentación por ecorregión. En el caso de las medidas de ajuste del modelo, se emplearon la prueba de Chi-cuadrada (X^2), el índice de bondad de ajuste comparativo (CFI) y la raíz del residuo cuadrático promedio de aproximación (RMSEA), los cuales han sido ampliamente documentados en su uso para la evaluación de modelos de ecuaciones estructurales (Lai & Green, 2016).

- **Estadística de prueba Chi-cuadrado.** La estadística de prueba de modelo más básica es el producto $(N - 1) FML$, donde FML es el valor del criterio estadístico (función de ajuste) minimizado en el estimador ML y $(N - 1)$ es uno menos que el tamaño de la muestra. En muestras grandes y asumiendo una normalidad multivariada, el producto $(N - 1) FML$ sigue una distribución Chi-cuadrado central con grados de libertad iguales a los del modelo del investigador, o df_M . Esta estadística se conoce como el modelo chi-cuadrado (X^2); también se conoce como el cociente de probabilidad chi-cuadrado o cociente de probabilidad generalizado. El valor de X^2 para el modelo identificado recientemente es generalmente igual a cero, pero técnicamente no es un modelo definido con un grado de libertad. Si $X^2 = 0$, el modelo se ajusta perfectamente a los datos (cada covarianza observada es igual a su contraparte implicada por el modelo). Si el ajuste de un modelo sobre-identificado que no está correctamente especificado empeora, entonces el valor de X^2 aumenta, por lo que X^2 es escalado como una estadística de mal ajuste. Es decir, X^2 estima el error de muestreo sólo para los modelos correctos (Kline, 2015).
- **Índice de ajuste comparativo (CFI):** es una medida de bondad del ajuste incremental, indica en qué grado es mejor el ajuste del modelo en comparación con un modelo de referencia, normalmente respecto al modelo de las variables independientes. Su valor puede oscilar entre 0 y 1, de modo que el ajuste será mejor cuanto más cerca de 1 sea el valor de este índice, se recomiendan valores superiores a 0.95 (Bentler & Bonett, 1980). La expresión para el cálculo del CFI se muestra en la Ecuación 18 (Cangur & Ercan, 2015).

$$CFI = 1 - \frac{\max[(x_t^2 - v_t), 0]}{\max[(x_t^2 - v_t), (x_i^2 - v_i), 0]} \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

max = el valor máximo

x_t^2 y x_i^2 = las pruebas estadísticas del modelo independiente y el modelo objetivo correspondiente.

v_t y v_i = los grados de libertad de ambos modelos en relación al estadístico de Chi-cuadrado.

- **Raíz del residuo cuadrático promedio de aproximación (RMSEA):** El RMSEA se reconoce como uno de las medidas de ajuste más informativas de los modelos en ecuaciones estructurales. A la hora de determinar la bondad de ajuste tiene en cuenta los grados de libertad, por lo que este índice es sensible al número de parámetros que estima el modelo (Barbero et al., 2011). Es un índice que muestra las diferencias entre la matriz de covarianza observada por grados de libertad y la matriz de covarianza (Ecuación 19) (Cangur & Ercan, 2015).

$$RMSEA = \sqrt{\max\left\{\left(\frac{F(S, \Sigma(\theta))}{v} - \frac{1}{n-1}\right), 0\right\}} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

$F(S, \Sigma(\theta))$ = La función de ajuste está minimizada.

max = Valor máximo.

v = Los grados de libertad.

n = Tamaño de muestra.

La totalidad de los análisis asociados a los modelos de ecuaciones estructurales, fueron realizados usando la paquetería LAVAAN de R (Rosseel, 2012; R Core Team, 2019).

Capítulo 4

Índice de Eficiencia Alimentaria y Ambiental en México

Assessing food security and environmental protection in Mexico with a GISbased Food Environmental Efficiency index

J. Mauricio Galeana-Pizaña, Stéphane Couturier, Alejandro Monsivais-Huertero

Revista: **Land Use Policy**; Año de Publicación: **2018**

Liga de descarga: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837717300765>

ABSTRACT

Trends in food security and environmental protection are usually reported separately and at national level, which may be a great limitation to the assessment of regional policies seeking to improve food self-sufficiency, reduce poverty, and at the same time conserve biodiversity. In this study, a spatially explicit, quantitative index relates national and regional trends of food security with trends of land use change in Mexico. Food security was estimated through aspects of food self-sufficiency (production and consumption patterns of basic staple crops and livestock) and food access (based on the marginalization level of households). Land use change was estimated from the official INEGI Land Use and Land Cover cartography. The Food Environmental Efficiency (FEE) Index was calculated for each ecoregion of Mexico over the past 40 years based on an arithmetic count of significant correlations between food security and land use change. Trends at national level suggest a continuous environmental degradation and no improvement in food security except for maize self-sufficiency. At ecoregion level, the FEE index indicates that livestock expansion in the three most affected ecoregions is associated with a decrease in food security and that extensive cropland expansion is associated with an increase in food security in only one of them. The FEE index proved useful for the assessment of land use policies, since it can weigh regional contributions to food security and environmental tendencies.

Keywords: Food self-sufficiency, Food access, Land use change, Natural capital, Spearman correlation

RESUMEN

Las tendencias en la seguridad alimentaria y la protección al medio ambiente generalmente se informan de forma separada y a escala nacional, lo que puede ser una limitación para la evaluación de las políticas regionales orientadas a mejorar la autosuficiencia alimentaria, la reducción de la pobreza y, al mismo tiempo, conservar la biodiversidad. En este estudio se presenta un índice cuantitativo, espacialmente explícito, que relaciona las tendencias nacionales y regionales de seguridad alimentaria y cambio de uso de suelo en México. La seguridad alimentaria se estimó a través de componentes clave de autosuficiencia alimentaria (patrones de producción y consumo de cultivos básicos y tipos de ganado) y de acceso a la alimentación (basado en el nivel de marginación). El cambio de uso de suelo se estimó a partir de la cartografía oficial de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI. El índice de Eficiencia Alimentaria-Ambiental (FEE) se calculó para cada ecorregión de México en los últimos 40 años dada la función aritmética de las correlaciones estadísticamente significativas entre la seguridad alimentaria y el cambio de uso de suelo. Las tendencias a nivel nacional sugieren una degradación ambiental continua sin ninguna mejora en la seguridad alimentaria, excepto en el caso de la autosuficiencia de maíz blanco. A nivel ecorregión, el índice FEE muestra que la expansión ganadera, en las tres ecorregiones con mayor impacto, se encuentra asociado con un decremento de la seguridad alimentaria, mientras que la expansión agrícola está asociada con un incremento en seguridad alimentaria sólo en algunas ecorregiones. El índice FEE demostró ser útil para la evaluación de las políticas de uso de suelo, pues este puede sopesar las contribuciones regionales a las tendencias de seguridad alimentaria y de cambio de uso del suelo.

Palabras clave: Autosuficiencia alimentaria, Acceso a los alimentos, Cambio de uso de la tierra, Capital natural, Correlación de Spearman

1. Introduction

The urgent need to address food security in less industrialized countries has led to policies and instruments that may undermine another urgent need, which is to preserve biodiversity and ecosystem services (Verburg et al., 2013; Fuss et al., 2015; Peng et al., 2015). The demand for food, prime materials and biofuels is the main driver of land use changes in the world (Smith, 2013; Verburg et al., 2013; Mbow et al., 2014; Van Wijk, 2014), and has led to the loss of forest to agriculture (Smith, 2013). Food security involves access by all people at all times to food of sufficient quantity and nutritional value for them to lead a healthy and active life (FAO, 2006). This definition includes concepts such as food availability (which requires a balance between population growth and food production), food access (which requires sufficient income to buy a range of goods to guarantee survival), food use (the actual consumption of food) and food stability (regular access to food) (Santos et al., 2014; Frayne and McCordic, 2015). Food security should be considered within an environmental context, especially regarding the consequences of climate change and environmental impacts on the biodiversity and soils (Fuss et al., 2015; Peng et al., 2015; Krishnamurthy et al., 2014). Production practices that drastically affect biodiversity, soil fertility and environmental services are counterproductive in the long run: food production in marginalized areas will decrease, and the risk of extreme natural events will increase (Verburg et al., 2013; Knoke

et al., 2013; Mbow et al., 2014; Crist et al., 2017). The negative impacts of food production on ecosystem services must be restricted: future demand for food should be met without extending croplands and grazing lands, and this will entail highly productive agricultural systems that sustain biodiversity (e.g. agro-ecological farming systems; Perfecto et al., 2009).

On the other hand, it is argued that poverty of the household has the most direct effect on the environment because it influences the ability to use technology and investment for the intensification of cropping where there is a land access constraint (Fisher et al., 2013; Reardon and Vosti, 1995). Because of its importance in international agendas (e.g. the Zero Hunger Challenge by the United Nations), food security has been assessed and monitored at a range of scales, especially at national level. This can involve various approaches: the balance between availability of food and needs of the population as influenced by production, imports, exports, wastes and aid (FAO, 2012); nutrients and required daily caloric intake (Warren et al., 2015); a combination of the two approaches (Peng et al., 2015); the Global Food Security Index (The Economist Intelligence Unit, webpage 2016) based on production capacity, food distribution, nutritional quality and the ability of the population to pay for food; and adaptation to climate change (e.g. Fuss et al., 2015). In Mexico, food security has achieved prominence with the “Crusade against Hunger” launched by the Federal Government in 2013. This campaign aims to improve food supply to extremely marginalized populations by subsidizing local crop production and increasing smallholder crop yields. A major goal of Mexican land use policy has been, over the past three decades, to increase food security (e.g. Mexican Food System program in 1981; Yúñez et al., 2013) and to reduce activities that contribute to global environmental change (e.g. General Law of Ecological Balance and Environmental Protection 1988).

Much debate remains, however, with respect to the rationality of subsidizing some major food production systems while at the same time claiming to protect major biodiversity hotspots (Muñoz-Piña et al., 2008; Schmook and Vance, 2009; Sarukhán et al., 2015). Indeed, the expansion over the past four decades of extensive agricultural land and its impact on highly biodiverse regions has been widely documented (Velázquez et al., 2003; Mas et al., 2004; Bonilla-Moheno et al., 2013; Moreno-Sanchez et al., 2014). This debate tends to overgeneralize contradictions across the Mexican territory. In order to solve for this overgeneralization, we argue that food security and environmental analysis should be spatially disaggregated into coherent ecogeographical units and that spatial indices based on standard national databases should be developed. Ecoregions (spatial units with similar ecosystem functions, resources and human activities; McDonald et al., 2005) are a useful concept in conservation and planning (Olson et al., 2001; McDonald et al., 2005; Dvorak and Volder, 2010). Seven of the fifteen ecoregions identified in North America are represented in Mexico (Koleff et al., 2011; Fig. 1; Table 1). We propose to develop the Food and Environmental Efficiency (FEE) index, based on food access, food self-sufficiency, and land use/land cover tendencies over the ecoregions of Mexico. We first estimated food security by the use of proxies for food self-sufficiency and food access, all of which have been used in institutional indicators, for example the Food Security Index from the FAO Hunger Target Global Monitoring (food stability through per capita food production and per capita food supply are employed through food self-sufficiency) and the Global Food Security Index of The Economist Intelligence Unit (food affordability is employed, through marginalization as a proxy of the proportion of the population under the global poverty line).



Fig 1. Ecoregions in Mexico.

We also estimated Land Use Change Processes (LUCPs) at a national level in Mexico using the Land Use and Vegetation Cover (LUVc) maps produced by the National Institute of Statistics and Geography (INEGI), the official source of land use information in Mexico. The FEE index was based on a correlation analysis between the estimated food security and land-use changes. This research addresses the following questions: In what ecoregion (s) occurred the greatest advance in food security and did this correspond to the largest expansion of extensive production systems? And: How are the increments or decrements in food security associated with environmental impacts? For example, a hypothesis to be verified in the context of ecosystem degradation would be that an increase in food security (food access, food self-sufficiency, or both) counterbalances a negative environmental impact. In order to answer these questions, we assessed lack of food access through a marginalization index, and food self-sufficiency from data related to annual production and per capita consumption. Then, these variables were correlated with the expansion of extensive agricultural systems derived from the INEGI records of land use and vegetation cover (1976, 1993, 2002, 2007, and 2011).

Table 1. Physical features of the ecoregions of Mexico (Koleff et al., 2011).

Ecoregion	No. climatic types	Annual rainfall (mm)	Minimum temperature (°C)	Maximum temperature (°C)	Vertebrate species biodiversity
Great Plains	15	200–1500	16–18	24–26	750
North American Deserts	25	< 50–1000	10–12	24–26	1000
Mediterranean California	8	50–500	10–12	18–20	400
Southern Semi-Arid Highlands	25	200–1500	8–10	22–24	1000
Temperate Sierras	45	200– > 4500	< – 2	> 28	1980
Tropical Dry Zone	35	50–2500	12–14	> 28	1890
Tropical Wet Zone	19	600– > 4500	14–16	26–28	1650

2. Method

A major purpose of this research is to propose a pragmatic method to estimate environmental efficiency for Food Security policies/tendencies (Fig. 2). The first step was to approximate food security through two major, complementary concepts: food access (or lack of access) and food availability (via food self-sufficiency).

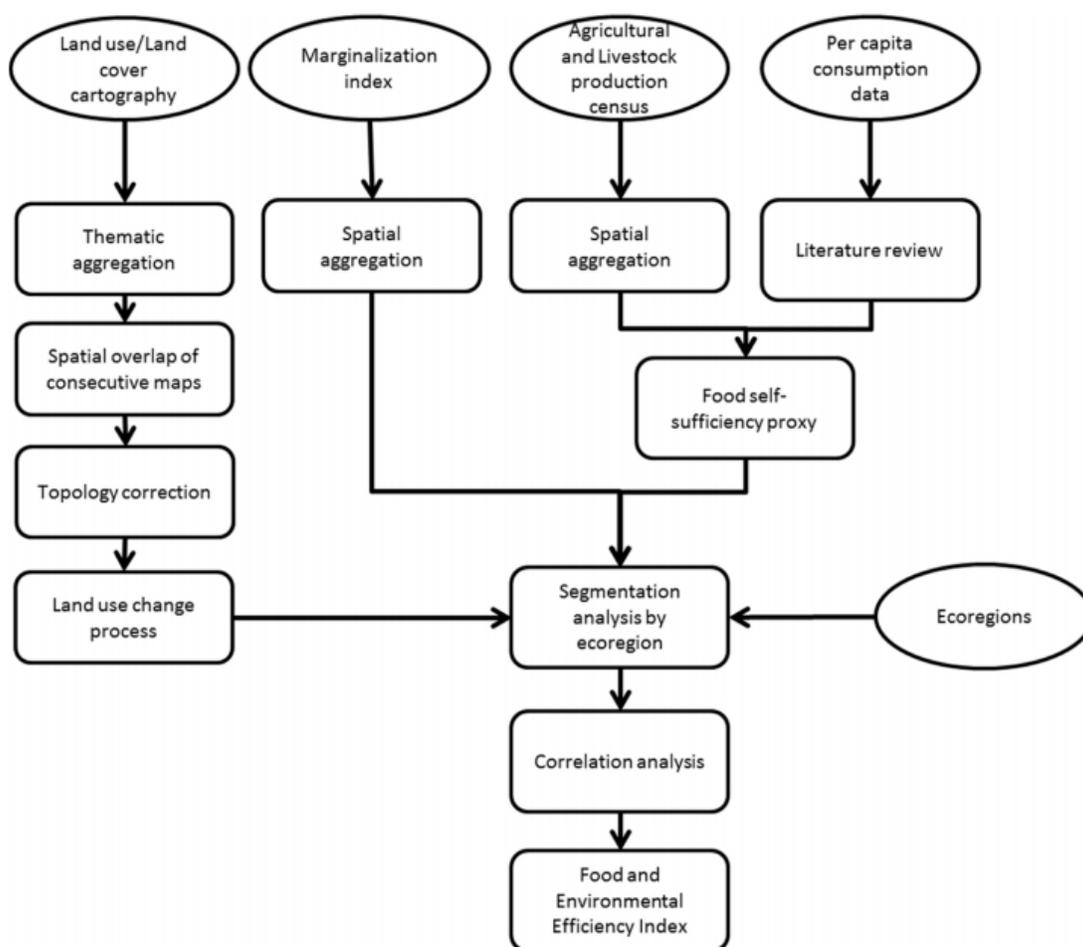


Fig. 2. Flowchart for Food and Environmental Efficiency (FEE) Index computation

One reason for selecting these aspects was the feasibility of their quantitative estimation in a timeframe compatible with the land use data. Second, land-use changes were estimated per ecoregion from national-level cartography. In a third step, food security indicators were related to

land-use changes, at national and ecoregion levels, using trend analysis and momentum correlation analysis. Next, a discrete Food Environmental Efficiency (FEE) index was built in each ecoregion as a function of the correlation strength between food security tendencies and environmental preservation tendencies. The index increases with food security increments and with lower environmental damage to the biosphere. Each step of the method is detailed in the following paragraphs.

2.1. Food access

The marginalization concept is related to social exclusion caused by economic growth and inequality (CONAPO, 2012). The marginalization index (MI) is computed by the National Population Council in Mexico (CONAPO, 2012) and is based on indicators associated with population distribution, housing conditions, education level, and labor income. The relationship between marginalization and access to/consumption of food has been acknowledged internationally (Ramos Peña et al., 2007; Cuéllar, 2011), and MI has been the major criterion of Mexican federal programs for the alleged goal of incrementing food access (e.g. the Strategic Project for Food Security; SAGARPA aid programs DICONSA and PROCAMPO). To support this view, it is argued that 80% of the families associated with high and very high marginalization, have an income equal to or lower than the threshold of food poverty (Peralta et al., 2016). Because our food security index is meant to assess the goals of food security policies, we estimated the lack of access to food on the basis of the Marginalization Index. MI was downloaded from the CONAPO website for the following time sequence: 1980, 1995, 2000, 2005 and 2010 (see Table 2). In all dates but 1980, the data was available at locality level. In 1980 we used the information at municipality level. Finally, in each ecoregion, a proxy for food access was computed as the inverse of the average MI.

Table 2. Characteristics of the Marginalization index (MI) per ecoregion.

Ecoregion	Year	# Observations	MI maximum value
Mediterranean California	1980	2	1.71
	1995	629	2.54
	2000	854	2.79
	2005	480	1.39
	2010	919	3.32
North American Deserts	1980	126	0.71
	1995	7556	1.87
	2000	7423	2.42
	2005	5791	2.50
	2010	6961	4.50
Southern Semi-Arid Highlands	1980	256	1.08
	1995	15987	2.21
	2000	15962	2.39
	2005	14370	2.62
	2010	16703	4.58
Great Plains	1980	71	0.76
	1995	2958	1.56
	2000	2889	2.10
	2005	2032	1.74
	2010	2569	2.65
Tropical Wet Zone	1980	332	2.26
	1995	21296	2.34
	2000	21605	2.93
	2005	19163	3.23
	2010	21472	4.74
Tropical Dry Zone	1980	603	2.59
	1995	22080	2.67
	2000	22411	3.02
	2005	18850	3.23
	2010	21686	6.35
Temperate Sierras	1980	1002	2.77
	1995	35129	2.80
	2000	35989	3.05
	2005	32470	3.23
	2010	37083	5.77

2.2. Food self-sufficiency

Food self-sufficiency is defined as “the extent to which a country can satisfy its food needs from its own domestic production” (FAO, 1999); in this sense, a country tends to food self-sufficiency if it can produce sufficient food to cover its own needs (Clapp, 2017). Based on this concept, food self-sufficiency can be estimated comparing the amount of food production versus the amount of food consumption. Food production was estimated from the annual yields of major crops and livestock (further explained below) obtained at municipality (local government) level, and made available by the Information Service for Agriculture, Food and Fisheries in Mexico (SIAP, 2016). Maize, wheat, rice and bean were the major crops considered in this study, and bovine and ovine the major livestock categories, because of their strategic value for food security and sovereignty in Mexico: They are listed in the Mexican Law of Sustainable Rural Development and Article 180 in this law specifies that their production and supply will be the axes of the national agricultural policy as well as a priority for international agreements and treaties on food security and sovereignty (Diario de la Federación, 2012). The data were collected for 1980, 1993, 2002, 2007 and 2011, considered the

best temporal match with the data for landuse changes, and were aggregated at ecoregion level. Average per capita consumption of the selected crops and livestock is provided by the Department of Agriculture in Mexico (SAGARPA) and the National Chamber of Transformation Industries (GarcíaUrigüen, 2012; Table 3). In order to estimate food consumption per ecoregion, these average data were multiplied by the population of all localities of each ecoregion, according to the INEGI population census collected in 1980, 1995, 2000, 2005 and 2010. The food consumption pattern was assumed similar among ecoregions, but the analysis could be refined using more precise data on food consumption distribution, not available in our case. Finally, a food self-sufficiency indicator (FSI) was estimated per ecoregion by the normalized difference between food production and food consumption:

$$\text{FSI} = (\text{production} - \text{consumption})/\text{consumption}$$

Table 3. Characteristics of the land use and vegetation cover cartography.

Land use and vegetation cover maps	Name	Sources of spatial data	Dates	Methods
1976	Series I	Aerial photographs	1968–1986	Field work and photointerpretation
1993	Series II	Landsat TM	1993	Interpretation of satellite images and field work to update 1976 map
2002	Series III	Landsat ETM	2002–2003	Interpretation of satellite images and field work
2007	Series IV	SPOT-5	2007–2008	Interpretation of satellite images and field work
2011	Series V	Landsat TM	2011	Interpretation of satellite images and field work

2.3. Land use change processes

Next, we collected the entire set of official INEGI national-level maps of land use and vegetation cover (LUVIC INEGI maps) produced at 1:250,000 scale. Although this cartography still lacks accuracy assessment to date, it is considered the most complete and reliable collection of semidetained land use maps in Mexico (Velázquez et al., 2003; Moreno-Sanchez et al., 2014), due to its continuity since 1976, the interpretation and cartographic long term experience of the INEGI staff, and the relative consistency in the map production process. This set corresponds to the time sequence (five “Series”) of 1976 (Series I), 1993 (Series II), 2002 (Series III), 2007 (Series IV) and 2011 (Series V) (Table 3). Although more than 300 land use/land cover categories are represented in this cartography and the classification legend differs from date to date, the five Series are compatible in an aggregated level. We proceeded to the aggregation of all Series to a common set of 29 land use/land cover classes. The consecutive maps (i.e. Series I and II, Series II and III, etc.) were geometrically joined and fused using a Geographic Information System (GIS) into $29 \times 29 = 841$ change labels, which were then topologically corrected to a legend corresponding to 8 major land-use change processes:

- a.) Permanence of agricultural system
- b.) Permanence of vegetation cover
- c.) Expansion of agricultural system over vegetation cover
- d.) Contraction of agricultural system with natural recovery
- e.) Conversion of an agricultural system to another
- f.) Degradation of vegetation cover
- g.) Urbanization
- h.) Undefined (possibly a thematic error of the map)

Due to the scale of the INEGI cartography (Minimum Mapping Unit of about 50 ha), note that the expansion and contraction of land uses is detected only for extensive agricultural systems, not isolated agricultural parcels.

2.4. Food and Environmental Efficiency (FEE) index

2.4.1. Trend analysis

In the first place, a potential relationship between food security (food access and food self-sufficiency estimated earlier) tendencies (FSTs) and land use tendencies (LUTs: e.g. agricultural expansion) was investigated by means of the comparison of trends at the national level and at the ecoregion level.

2.4.2. Correlation coefficient

Then, a correlation coefficient was built in order to seek a strong relationship between food security tendencies (FSTs) and land use tendencies (LUTs) at ecoregion level. The differences in food access and food self-sufficiency were calculated per ecoregion for each time period (e.g. 1980–1995; 1995–2000; 2000–2005; 2005–2010). Then, a Spearman product moment coefficient was computed between FST and LUT. A matrix of correlation coefficients was formed from the comparison between FST (columns) and LUT (rows).

2.4.3. Food and Environmental Efficiency (FEE) Index

Finally, the Food and Environmental Efficiency Index consisted in an arithmetical count of all matrix elements according to the following decision rules based on the comparison between Food Security Tendency (FST) and Land Use Tendency (LUT):

- a)** The correlation is statistically significant*; FST ** is positive and the correlation coefficient is negative. FEE index incremented by 1.
- b)** The correlation is statistically significant*; FST** is positive and the correlation coefficient is positive. FEE index incremented by 0.5.
- c)** The correlation is not statistically significant*, then FEE index unchanged.
- d)** The correlation is statistically significant*; FST** is negative and the correlation coefficient is positive. FEE index decremented by 0.5.
- e)** The correlation is statistically significant*; FST** is negative and the correlation coefficient is negative. FEE index decremented by 1.

*Correlation was considered statistically significant if the absolute value of the Spearman coefficient was greater than 0.6 and the associated p-value was < 0.05. **Tendency is the slope of the linear trend of the variable along time.

3. Results

3.1. National trend of food security

At the national level, the overall tendency of food security in Mexico was as follows. Food access does not have a clear trend (whether positive or negative): in 1980, 1990, 2000 and 2005 it was low (i.e. high marginalization), whereas in 1995 and 2010 it was average (i.e. average marginalization). In terms of food self-sufficiency, maize and bean consumption reduced drastically from 1980 to 2011 (by 58% and 46% respectively), while maize production increased by 37% but bean production decreased by 39%. The consumption of other crops remained relatively stable while wheat production increased by 30% and rice production decreased by 60%. Meanwhile, the consumption of bovine meat remained relatively stable and the consumption of ovine meat nearly tripled while their production steadily increased (by 70% and 154% respectively) (Table 4). Maize production, historically lower than maize consumption, tended to increase (as reported by SAGARPA, 2016) and get closer to the consumption level (FSI increased from -0.69 to -0.4). By contrast, for all other crops self-sufficiency has tended to decrease (from -0.26 to -0.51 for wheat, from -0.35 to -0.57 for bean, and from -0.21 to -0.86 for rice). Livestock production in 1980 almost met the theoretical demand for meat in Mexico. Between 1980 and 2002, consumption of bovine meat increased and the FSI decreased in spite of sustained increased production. However, the consumption subsequently stabilized, and the FSI increased to -0.13 in 2011. Meanwhile, the increase in consumption of ovine meat tended to maintain a negative balance of self-sufficiency in the final three decades (-0.41 in 2011). In synthesis, at national level there is no clear positive or negative trend in food access but there has been a trend towards a loss of food self-sufficiency with respect to all crops and livestock with the exception of maize and, recently, bovine meat (Table 4).

3.2. National trend of land use change

In terms of land-use change, croplands and grazing land expanded at a relatively stable rate of 300,000–366,000 ha/year between 1976 and 2007 (Table 5), associated to some degree with the increased production of maize, wheat and bovine meat, as well as with the expansion of the extensive type of livestock systems. Then, between 2007 and 2011, the increase in cropland and grazing land fell to 175,000 ha/ year (Table 5). Additionally, crops and livestock systems contracted spatially (at rates about half the expansion rate), and then expanded again in other directions (Fig. 3), creating agricultural frontiers with stages of vegetation recovery that differed from previous expansions. In synthesis, a continuous expansion of croplands and grazing lands occurred at the expense of natural ecosystems (already reported in previous studies such as Mas et al., 2004 and Mas et al., 2009), and, beyond the conversion to croplands and grazing lands, a substantial portion of the territory was converted to secondary vegetation as a result of a past land use change, an effect on biodiversity which is usually overlooked by official national and FAO summary reports.

Table 4. Food self-sufficiency indicator (FSI) in Mexico. Population data from INEGI census.

Crop/ livestock	Year	Annual per capita consumption (kg)	Annual production (ton)	Annual consumption (ton)	FSI
Maize	1980	568.1	12,374,400	39,965,835	-0,69
	1993	363.4	18,125,263	33,305,610	-0,46
	2002	241.50	18,659,820	25,768,050	-0,28
	2007	290.0	23,595,189	32,915,000	-0,28
	2011	239	16,996,191	28,536,600	-0,40
Wheat	1980	53.6	2,784,914	3,770,760	-0,26
	1993	59.9	3,582,450	5,489,835	-0,35
	2002	58.82	3,225,695	6,276,094	-0,49
	2007	57.6	3,507,959	6,537,600	-0,46
	2011	61.6	3,623,078	7,355,040	-0,51
Rice	1980	8.0	445,364	562,800	-0,21
	1993	7.1	287,180	650,715	-0,56
	2002	9.18	215,498	979,506	-0,78
	2007	10.5	294,697	1,191,750	-0,75
	2011	9.7	173,460	1,158,180	-0,85
Bean	1980	20.6	935,174	1,449,210	-0,35
	1993	14.5	1,287,573	1,328,925	-0,03
	2002	16.28	1,533,036	1,737,076	-0,12
	2007	10.0	991,126	1,135,000	-0,13
	2011	11.1	566,146	1,325,340	-0,57
Bovine meat	1980	15.9	1,065,070	1,118,565	-0,05
	1993	15.5	1,256,478	1,420,575	-0,12
	2002	19	1,467,569	2,027,300	-0,28
	2007	18.6	1,633,901	2,111,100	-0,23
	2011	17.3	1,802,759	2,065,620	-0,13
Ovine meat	1980	0.3	22,270	21,105	0,06
	1993	0.5	28,672	45,825	-0,37
	2002	0.84	38,195	89,628	-0,57
	2007	0.7	48,412	79,450	-0,39
	2011	0.8	56,429	95,520	-0,41

Table 5. Expansion and contraction of food production systems.

Land use change	1976-1993		1993-2002		2002-2007		2007-2011	
	Area (million ha)	Annual rate						
Cropland expansion	5.2	305,882	3	333,333	1.8	360,000	0.7	175,000
Cropland contraction	2.7	158,824	1.7	188,889	1	200,000	0.5	125,000
Grazing land expansion	5.8	341,176	3.3	366,667	1.6	320,000	0.7	175,000
Grazing land contraction	1.9	111,765	1.7	188,889	1	200,000	0.3	75,000

These results raise the question of how food security policies have related to environmental protection policies in the last three decades, and how this relationship, understood in a spatial framework, could be improved. When disaggregated per ecoregion, food access values (computed as the inverse of marginalization) remained low for five of the seven ecoregions in Mexico: North

American Deserts, Southern Semi-Arid Highlands, Tropical Wet Zone, Tropical Dry Zone and Temperate Sierras; factors in this deficiency included insufficient access to education, inadequate housing, overcrowded households, and a perception of insufficient monetary income (CONAPO, 2012). In contrast, food access was high in Great Plains and very high in Mediterranean California (Fig. 4, Table 6). Additionally, most ecoregions were found food dependent (negative food self-sufficiency indicator – FSI: Fig. 5) for basic crops. As expected, FSI was positive for ecoregions where productive systems of the crop are most abundant: wheat and bean in North American Deserts, and rice in the Tropical Wet Zone. In spite of high productivity in the Temperate Sierras, maize is not self-sufficient there, maybe because of the very high consumption (major population concentration of the country). Instead, maize tends to self-sufficiency in the Tropical Dry Zone (Fig. 5a–d). The FSI for bovine production was high in the Tropical Wet Zone, probably owing to the widespread presence of extensive livestock systems in that ecoregion (Fig. 5e). In terms of ovine production, none of the ecoregions was self-sufficient (Fig. 5f).



Fig. 3. Expansion and contraction of food production systems 1976–1993.

3.3. Trend of land use change at eco-region level

The major expansion of production systems occurred between 1976 and 1993, mostly in the Tropical Wet Zone and in the Great Plains (Fig. 3). The largest accumulated (from 1976 through to 2011) crop

expansion occurred in the Tropical Wet Zone and the Temperate Sierras (Fig. 6), representing 51% of the total national crop expansion. The corresponding ecosystem reduction mostly affected secondary vegetation cover (44.25%), then scrublands (31.25%) and then primary vegetation cover (24.5%). In terms of grazing land expansion, the most affected ecoregions were the Tropical Wet Zone and the Tropical Dry Zone, where 58% of all changes occurred. Loss of secondary vegetation represented 59.5% of the loss of natural ecosystems in these two ecoregions, followed by primary vegetation (23.25%) and scrublands (17.25%).

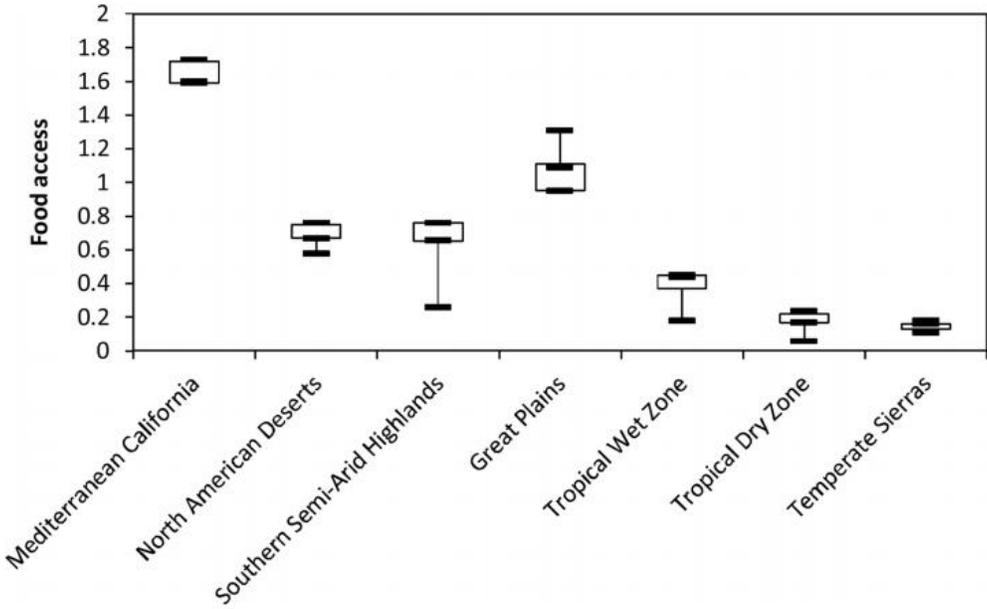


Fig. 4. Food access per ecoregion in Mexico 1980–2010 (box plots computed from the inverse values of the CONAPO Marginalization Index).

3.4. Possible relationships between food security and land use change by trend analysis

According to our national level analysis, the continuous expansion of croplands and grazing lands reported earlier does not seem to be associated with a positive trend in terms of food access. At ecoregion level, we found that food access remained low in the two ecoregions most affected by the expansion of croplands as reported earlier (Tropical Wet Zone and Temperate Sierras). Similarly, food access has improved neither in the Tropical Wet Zone nor in the Tropical Dry Zone, where the greatest grazing land expansion occurred. Both of these ecoregion-level results corroborate the national-level analysis whereby the hypothesis of an improvement of food access as a consequence of the expansion of extensive agricultural systems seems to prove false. Likewise, at national level, no improvement of food self-sufficiency has been registered for all crop types but maize, and for ovine production. By contrast, the national food self-sufficiency indicator (FSI) of maize tended to increase over the entire time period (despite remaining negative) and the national FSI of bovine tended to increase since 2002 (despite remaining negative).

On the other hand, the two ecoregions most affected by the expansion of croplands as reported earlier (Tropical Wet Zone and Temperate Sierras) are characterized by negative self-sufficiency

indicators (FSI) for all crops except rice in the Tropical Wet Zone. In the case of rice production however, almost confined to the Tropical Wet Zone (which explains the positive self-sufficiency of rice in that ecoregion), its contribution to the expansion of croplands is probably very low compared with that of other crops. By contrast, food self-sufficiency was found positive for bovine meat in the Tropical Wet Zone, one of the two ecoregions most affected by the expansion of extensive livestock systems. In this case, the ecoregion-level analysis seemed to negate the hypothesis suggested by national level analysis that an improvement in food self-sufficiency could be a consequence of the expansion of extensive maize production. In synthesis, the expansion in agricultural systems throughout the four last decades does not seem to have been accompanied by a substantial increase in food access. The expansion of croplands in ecoregions with the highest annual rates does not seem to have been accompanied by a substantial increase in self-sufficiency either, even for maize. By contrast, the expansion of grazing lands in the Tropical Wet Zone may have been accompanied recently by an improvement in self-sufficiency of bovine meat in the country. In order to explore relationships between food security and land use change over the entire time period, and for the entire set of food security indicators, we analyzed the correlation matrix between these tendencies (Table 7).

Table 6. Average Food Access (AFA) for different periods of time per ecoregion.

Ecoregions	AFA 1980	AFA 1995	AFA 2000	AFA 2005	AFA 2010	All-period AFA	AFA category ^a
Mediterranean California	1.6	1.59	1.73	1.72	1.59	1.64	Very high
North American Deserts	0.58	0.67	0.76	0.75	0.67	0.69	Low
Southern Semi-Arid Highlands	0.26	0.76	0.66	0.65	0.76	0.62	Low
Great Plains	1.31	0.95	1.11	1.09	0.95	1.08	High
Tropical Wet Zone	0.18	0.45	0.44	0.37	0.45	0.38	Low
Tropical Dry Zone	0.06	0.17	0.22	0.24	0.17	0.17	Low
Temperate Sierras	0.18	0.16	0.11	0.13	0.16	0.15	Low

^a AFA was computed as the inverse of the average value of CONAPO Marginalization Index (CONAPO, 2012).

Table 7. Correlation between the food security trend (FST) and the land use trend (LUT) along the 1976 – 2011 time period. These results are based on the Spearman product-moment correlation between food security and land use variables (5 dates). Significance levels of the correlation are shown as *.01 < P < .05, ** P = < .01 and ns P > 0.05.

Land use change	Ecoregion	Cropland expansion	Grazing land expansion	Food access	Food self-sufficiency for Maize	Food self-sufficiency for Wheat	Food self-sufficiency for Rice	Food self-sufficiency for Bean	Food self-sufficiency for Bovine meat	Food self-sufficiency for Ovine meat
Cropland expansion	Mediterranean California	1.00	0.40 ^{ns}	-0.96 ^{**}	-0.60*	0.20 ^{ns}	No production	0.96 ^{**}	-0.57 ^{ns}	0.35 ^{ns}
	North American Deserts	1.00	0.60*	0.60*	0.60*	-0.60*	No production	-0.60*	-0.40 ^{ns}	0.40 ^{ns}
	Southern Semi-Arid Highlands	1.00	0.80 ^{**}	-0.60*	0.40 ^{ns}	-0.60*	0.94 ^{**}	0.40 ^{ns}	0.20 ^{ns}	0.20 ^{ns}
	Great Plains	1.00	0.96 ^{**}	-0.96 ^{**}	0.20 ^{ns}	-0.20 ^{ns}	No production	-0.96 ^{**}	0.40 ^{ns}	-0.40 ^{ns}
	Tropical Wet Zone	1.00	0.40 ^{ns}	0.80 ^{**}	-0.40 ^{ns}	-0.60*	0.40 ^{ns}	0.60*	0.05 ^{ns}	0.40 ^{ns}
	Tropical Dry Zone	1.00	0.96 ^{**}	0.40 ^{ns}	0.60*	-0.20 ^{ns}	-0.15 ^{ns}	0.40 ^{ns}	-0.80 ^{**}	0.20 ^{ns}
	Temperate Sierras	1.00	0.96 ^{**}	-0.60*	0.20 ^{ns}	-0.96 ^{**}	No production	-0.40 ^{ns}	-0.40 ^{ns}	0.20 ^{ns}
Grazing land expansion	Mediterranean California	0.60*	1.00	-0.60*	-0.40 ^{ns}	0.80 ^{**}	No production	0.40 ^{ns}	0.20 ^{ns}	0.96 ^{**}
	North American Deserts	0.60*	1.00	-0.20 ^{ns}	0.80 ^{**}	-0.80 ^{**}	No production	0.40 ^{ns}	0.60*	-0.96 ^{**}
	Southern Semi-Arid Highlands	0.80 ^{**}	1.00	0.60*	0.60*	0.05 ^{ns}	-0.40 ^{ns}	0.80 ^{**}	-0.20 ^{ns}	0.05 ^{ns}
	Great Plains	0.96 ^{**}	1.00	-0.80 ^{**}	0.60*	-0.05 ^{ns}	No production	0.96 ^{**}	0.80 ^{**}	-0.40 ^{ns}
	Tropical Wet Zone	0.40 ^{ns}	1.00	-0.05 ^{ns}	-0.40 ^{ns}	-0.96 ^{**}	0.60*	0.96 ^{**}	-0.96 ^{**}	0.60*
	Tropical Dry Zone	0.96 ^{**}	1.00	0.40 ^{ns}	0.96 ^{**}	0.20 ^{ns}	-0.20 ^{ns}	0.96 ^{**}	0.20 ^{ns}	0.40 ^{ns}
	Temperate Sierras	0.96 ^{**}	1.00	-0.4 ^{ns}	0.40 ^{ns}	-0.96 ^{**}	No production	0.05 ^{ns}	-0.60*	0.40 ^{ns}

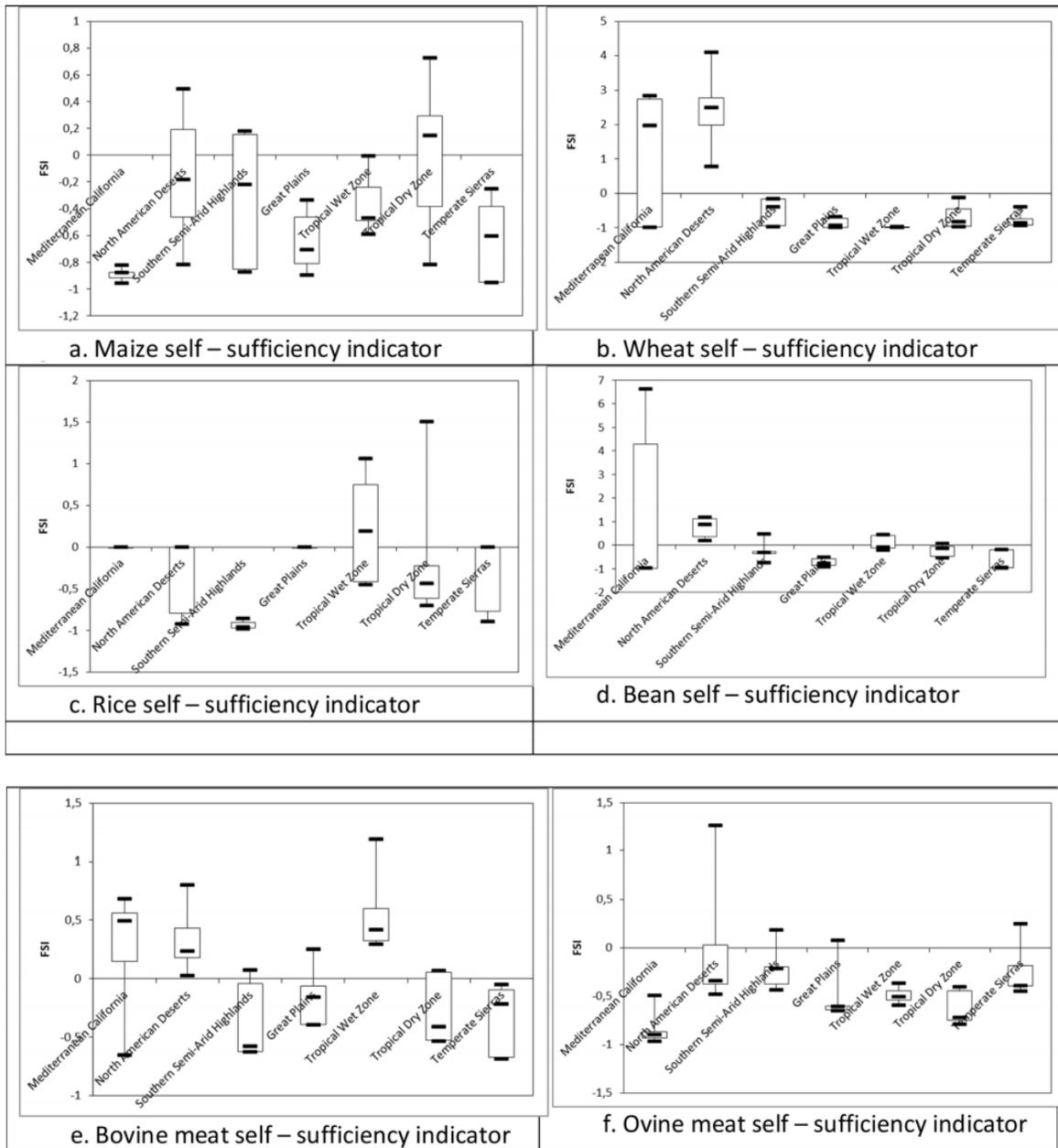


Fig. 5. Distribution of the food self-sufficiency indicator per ecoregion over the 1980–2010 time period (5 dates). a: Maize; b: Wheat; c: Rice; d: Bean; e: Bovine meat; f: Ovine meat. Plot marks indicate minimum and maximum values, 25th and 75th quartile and median value (middle line). Food self – sufficiency is calculated as $[(\text{production} - \text{consumption})/\text{consumption}]$. A positive self – sufficiency median value indicates that a majority of the 5 observed dates has shown self – sufficiency in that ecoregion (i.e. food production was higher than food consumption).

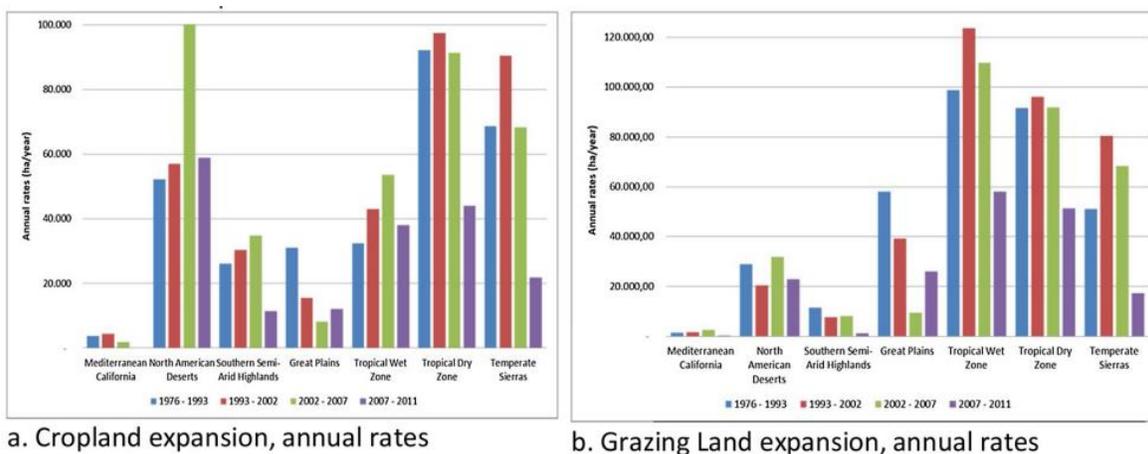


Fig. 6. Annual rates of expansion of production systems.

3.5. Relationships between food security and land use change by correlation analysis

The Food Environmental Efficiency (FEE) index was calculated for agricultural systems and reflects systematic correlation behavior over time for the complete set of indicators. FEE is the sum of all columns in Tables 8 and 9 (see the methods section). According to this index, while extensive cropland systems expanded in North American Deserts and the Tropical Wet Zone, the environmental impact was accompanied by reduced food security in many aspects (strongly negative values, see Table 8). Similarly, the expansion of livestock systems was in fact mostly accompanied by a loss of food security (non-positive FEE values for all ecoregions except Temperate Sierras, see Table 9). By contrast, food security increased (positive FEE values) in three ecoregions (Southern Semi-Arid Highlands, Great Plains and Temperate Sierras) when croplands expanded (see Table 8). Further comparisons and analysis per ecoregion can be achieved by the reader using these tables and indices.

Table 8. The Food Environmental Efficiency (FEE) index for cropland expansion. The FEE index is computed as the sum of all columns.

Land use change	Ecoregion	Food access	Food self-sufficiency for Maize	Food self-sufficiency for Wheat	Food self-sufficiency for Rice	Food self-sufficiency for Bean	Food self-sufficiency for Bovine meat	Food self-sufficiency for Ovine meat	FEE index (Sum)
Cropland expansion	Mediterranean California	-0.5	1	0	0	-0.5	0	0	0
	North American Deserts	-1	0.5	-1	0	-1	0	0	-2.5
	Southern Semi-Arid Highlands	1	0	-1	0.5	0	0	0	0.5
	Great Plains	-0.5	0	0	0	1	0	0	0.5
	Tropical Wet Zone	-1	0	-1	0	-1	0	0	-3
	Tropical Dry Zone	0	-1	0	0	0	0.5	0	-0.5
	Temperate Sierras	-0.5	0	1	0	0	0	0	0.5

Table 9. The Food Environmental Efficiency (FEE) index for grazing land expansion. The FEE index is computed as the sum of all columns.

Land use change	Ecoregion	Food access	Food self-sufficiency for Maize	Food self-sufficiency for Wheat	Food self-sufficiency for Rice	Food self-sufficiency for Bean	Food self-sufficiency for Bovine meat	Food self-sufficiency for Ovine meat	Sum
Grazing expansion	Mediterranean California	-0.5	0	-0.5	0	0	0	-0.5	-1.5
	North American Deserts	0	0.5	-1	0	0	0.5	-1	-1
	Southern Semi-Arid Highlands	1	-0.5	0	0	-0.5	0	0	0
	Great Plains	-0.5	-0.5	0	0	1	-0.5	0	-0.5
	Tropical Wet Zone	0	0	-0.5	-0.5	-0.5	0.5	-0.5	-1.5
	Tropical Dry Zone	0	-0.5	0	0	-0.5	0	0	-1
	Temperate Sierras	0	0	0.5	0	0	0.5	0	1

4. Discussion

4.1. Trends of land use change

Among sub-tropical countries, Mexico is recognized for its active debate on the expansion of agricultural production systems onto areas of natural ecosystems (Muñoz-Piña et al., 2008). Recent discourses in Mexico have announced the stabilization of agricultural frontiers since the early 2000s (Balvanera et al., 2009). But these discourses are based on the account of net area differences over time at the national level (SIACON, 2013) computed from the official INEGI maps of land use and vegetation cover (LUVIC INEGI maps), as is reported by the Global Forest Resources 2010 FAO report (FAO, 2010). In our study, the expansion and contraction of agricultural systems are quantified and show a considerable amount of land under dynamic pressure from the agricultural frontier in spite of the reduction of the expansion rate by about half for the 2007–2011 time period. Uncertainty did affect our area estimates of Land Use Change Processes (LUCP), due to inaccuracies of the official LUVIC INEGI maps which propagate to land use change maps. Unfortunately, these inaccuracies have not been estimated through a rigorous accuracy assessment to date by INEGI (Mas et al., 2016). Preliminary results from a rigorous accuracy assessment study by the authors (unpublished data) of some of these land use change maps suggest a consistent overestimate of the magnitude of expansion as well as contraction rates of agricultural systems; the overestimate is attributed to false changes corresponding to distinct acquisition conditions of the set of satellite imagery from one series to the next, therefore the overestimate should be somehow consistent along the entire historical sequence. Consequently, the bias should not affect much our ecoregion level trend analysis since the relevant LUCPs were assimilated as constant expansion and contraction over time. Since the Spearman correlation coefficient is sensitive to subtler variations of land use changes from one period to the next, the FEE index may be affected by this bias.

4.2. Contribution of single factor trend analysis to land use policy in Mexico

The results of the trend analysis (Section 3.5) should be valuable to land use policy in Mexico; For the vast majority of food security factors, the expansion of extensive production systems do not relate to a clear, quantitative improvement, a result which should be considered in the assessment of agricultural policies over 40 years. Additionally, the improvement in maize self-sufficiency registered at national level over this period of time may in fact be associated with other causes than to the expansion of croplands, since our trend analysis at ecoregion level shows that no such

improvement occurred in ecoregions mostly affected by this cropland expansion. This result warns of possible limitations of traditional national – level analysis alone. On the other hand, the improvement in bovine meat self-sufficiency registered at national level over the period 2002–2011 could indeed be associated to the expansion of grazing lands in the Tropical Wet Zone, a result which corroborates well-known conversion tendencies of agricultural activities to the grass fed beef industry nationwide, for its economic benefits to local peasants and investors (Schmook and Vance, 2009; Sarukhán et al., 2015). However, this expansion in the Tropical Wet Zone is environmentally unsustainable, owing to the very high biodiversity, acting itself as a buffer for the local population against environmental and economic risks (Mijatović et al., 2013). Now, the concept of bovine meat self-sufficiency (based on the actual consumption trend of the population) can be seriously challenged as an adequate contributor to food security in Mexico with respect to other contributors: the overconsumption of meat is one of the main challenges of public health policies in Mexico (Campos-Pérez et al., 2016), causing major diseases such as diabetes and hypertension.

Also, because they rely on available time consistent data, our proxies for food access and food self-sufficiency may not reflect some important features of these concepts. In the case of food access, rural households labeled as highly marginalized (and hence with low “food access”) may in fact benefit from a well-balanced and sufficient diet because of adequate livelihood strategies which include access to goods from subsistence agriculture and hunting. These livelihood strategies relate to major aspects of food security such as the contribution of smallholder agriculture and agro-ecology (Bermeo et al., 2014; Bermeo and Couturier, 2017), and yet are not reflected in the marginalization index. In other official data (e.g. the agricultural census), some variables may relate to this feature although the nationwide availability of the data (only two dates) is insufficient for its incorporation in our study. Consequently, food access (including subsistence livelihood strategies) in this research may be underestimated in ecoregions with high rural population (e.g. the Tropical Wet Zone, the only ecoregion where the rural population is a majority) with respect to food access in ecoregions with predominantly urban population (e.g. Temperate Sierra).

In the case of food self-sufficiency, consumption was computed on the basis of an average value per capita. This estimate could be improved by using different figures for rural and urban settings within an ecoregion. According to García-Urigüen (2012), daily per capita intake of maize is 148 g in cities greater than 100,000 inhabitants while it is 234.2 g in localities smaller than 2500 inhabitants, although this is difficult to generalize over time. Consequently, in this research, maize self-sufficiency may be overestimated in ecoregions with predominantly rural population (e.g. Tropical Wet Zone) and underestimated in ecoregions with predominantly urban population (note that this food self-sufficiency bias is opposite to the food access bias commented above). In this sense, each factor taken alone (such as single crop/single livestock self-sufficiency, or food access) fails to accurately represent the concept of food security in the country. The Food and Environmental Efficiency (FEE) index allows a more holistic (perhaps more balanced for a mix of rural and urban settings) estimate of food security using 7 factors of food security rather than one.

4.3. Contribution of the Food and Environmental Efficiency (FEE) index to land use policy in Mexico

According to the FEE index, in all but two ecoregions, food security decreased while grazing lands expanded (see section 3.6), and this decrease was especially high in the Tropical Wet Zone (FEE index value of -1.5). This result challenges the ecoregion single factor analysis above (Section 4.2),

is contradictory to the increment in food security suggested by a national level trend analysis, and warns of possibly highly negative consequences of land use policies aiming at promoting and sustaining livestock systems for the sake of national food security (the case of the most influential agricultural incentive programs ongoing for 25 years in Mexico), especially in the Tropical Wet Zone. Likewise, food security decreased sharply with cropland expansion in the Tropical Wet Zone (FEE = -3) and North American Deserts (FEE = -2.5). Instead, cropland expansion in three ecoregions (Southern Semi-Arid Highlands, Great Plains and Temperate Sierras) was associated with an increment of food security (positive FEE values). This result was not perceived by trend analysis and suggests that these ecoregions are more suitable for sustaining cropland than the Tropical Wet Zone. National trend analysis denoted an improvement of maize self-sufficiency but failed to capture the contribution of other crops in the estimation of food security, a contribution which was incorporated in the FEE index.

Finally, one should beware of erroneous interpretations associated with increments in food security through the FEE index analysis. One should keep in mind that getting closer to the balance between food production and food consumption does not mean that the Mexican population (or in this case the population of an ecoregion) is actually consuming the food produced in Mexico (in the same ecoregion). It only means the Mexican society *could* mostly consume the food produced nationally or regionally. For example, cropland expansion and the increment in food security obtained in the Southern Semi Arid Highlands, Great Plains and Temperate Sierra could be explained by the incremented production of food for exportation, while the Mexican population in these ecoregions might in fact experience a lack of access to food produced in these ecoregions. While food security policies may drive some of the increment of food production in Mexico, probably stronger drivers are associated with the demand for exportation of food from Mexico, because of the specific, restricted position of Mexico within the globalized food distribution network. Likewise, the increment of beef meat production in the Tropical Wet Zone could be associated with more exportation to the USA, while more imported beef from elsewhere would be consumed by the Mexican population. In this sense, the FEE indicator presented in this research, based on a simple food self-sufficiency indicator, reflects theoretical food self-sufficiency and not food independency; data on importation/exportation patterns should be incorporated for interpretation of the results in terms of real fluxes for food production – consumption.

5. Conclusion

The main object of this research is to set a baseline in Mexico for long term trend studies in food security and land use change, in order to establish possible relationships that are useful for national level land use policies. To this respect, the contribution of this article is multifold:

In the first place, we present the first land use change assessment in Mexico for the 35-year time span 1976–2011, focused on extensive agricultural activity versus natural ecosystems. As was shown by studies on time periods until 2007 (Mas et al., 2004; Mas et al., 2009), a continuous expansion of croplands and grazing lands at the expense of natural ecosystems occurred nationwide. Beyond the conversion to croplands and grazing lands, we evidenced that a substantial portion of the territory was converted to secondary vegetation as a result of past land use changes, an effect on biodiversity which is usually overlooked by official national and FAO summary reports. Second, a national level food security trend analysis revealed that there is stagnation of food access nationwide (low to

average food access) in the 1976–2011 time period, and there has been a trend towards a loss of food self-sufficiency with respect to all crops and livestock with the exception of maize and, only recently, bovine meat. Third, trend analysis at ecoregion level mostly confirms the trend at national level: low food access and negative food self-sufficiency for most crops and livestock in each ecoregion. However, in the case of maize, the hypothesis by which the expansion of cropland throughout the country could have triggered an improvement in maize self-sufficiency at national level, is deterred at ecoregion level: 51% of the accumulated cropland expansion occurred in the Tropical Wet Zone and in the Temperate Sierras (inhabited by the largest concentration of the Mexican population), where maize self-sufficiency has not improved and remained largely negative. Maize self-sufficiency has improved instead in ecoregions such as the Tropical Dry Zone, where the expansion of cropland was much lower, with the possible implication that other factors caused the improvement of maize self-sufficiency in the country.

Fourth, with the more holistic analysis (seven factors of food security) using the Food Environmental Efficiency (FEE) index, we found that major cropland expansions in the Tropical Wet Zone and in North American Deserts were in fact associated with greatly reduced food security there (highly negative FEE values), implying re-thinking of extensive cropland expansion as an incentive for food security. The FEE analysis also deterred a possible interpretation of national level trends that food security might have improved since 2002 due to the enhancement of bovine meat self-sufficiency; indeed, the expansion of grazing lands correlated with decreasing food security for all but two ecoregions. In the meanwhile, cropland expansion did correlate with increasing food security for three ecoregions, meaning that cropping is more likely associated with food security in Mexico than livestock activity. Beyond the value of the above results for Mexico, the ecoregion level trend analysis and the FEE index proved useful to confirm or correct traditional, single factor trends detected by a national level analysis. These tools are replicable with similar or updated official data for future assessment of food security and environmental protection, and are perhaps more adequate for policy application and assessment than existing analytic tools. In this sense, the FEE index is proposed as a complement to existing national-level food security indices (FAO Hunger Target Global Monitoring program or Global Food Security Index from the Economist Intelligence Unit).

Parallel studies of our research team focus on the spatial footprint of nutrition security for Mexico City and the Mexican Central region. For the purpose of enhancing public policies toward improving community wealth, infrastructure, distribution of household assets, agro-biodiverse forms of food production, nutrition security (Bermeo et al., 2014; Fisher et al., 2013; Tscharntke et al., 2012; Crist et al., 2017), it is important to substantially broaden the scope of food access and food self-sufficiency as reflected by currently available data, because some of these aspects are ignored in the FEE index presented in this research. In this sense we suggest that public institutions such as SAGARPA and INEGI generate and publish more frequently and more detailed data on smallholder agriculture, livelihood production strategies and consumption patterns over time and space, as specified in some former census formats (e.g. Coffee Production census; Agricultural census). Among limitations of ecoregion based indices for policy making, there certainly are obstacles to the implementation of public policies to agricultural systems at ecoregion level; the diversity of land ownership types, the disparity of socio-economic and ethnic backgrounds within an ecoregion, and rural demographic pressure, are all possibly challenging factors where the involvement of actors at

local to regional scales is required. To this regard, the social-ecological spatial frameworks have been proposed as better suited for driver analysis and implemented in previous studies (Castellarini et al., 2014; Leslie et al., 2015). In order to assess specific food security policies or tendencies, the FEE index, or an adaptation of the FEE index, could be computed within this more detailed framework.

The arithmetic computation of the FEE index makes it scalable to more, or more adequate, food security factors (e.g. poverty types, nutrition security within food self-sufficiency, etc., Poulsen et al., 2015; Crist et al., 2017), allowing several ways to improve the quality of the index. Also, the robustness of the FEE index may be enhanced when the accuracy of the national LUVVC maps and corresponding change maps in Mexico is estimated and known. This could be achieved using accuracy assessment methods developed for this purpose in Mexico (Couturier et al., 2012; Mas et al., 2016) and already implemented on national cartography (Couturier et al., 2010 as well as unpublished data). Because the FEE index is more holistic (multifactorial), but more sensitive to data uncertainty than trend analysis, we suggest both be applied as complementary tools. As a consequence of the above, ecoregion level trend analysis and FEE index could provide a useful baseline for food security and land use tendencies in subtropical countries with similar socioeconomic and environmental challenges.

Acknowledgements

The research underlying this work has received funds from CENTROGEO (Research Center for Geography and Geomatics), CONACYT (the Public Research Fund Agency in Mexico), and UNAM university, through the following projects: CentroGeo funded project "Geoweb platform for a development network in food sovereignty"; CONACYT funded project number 2015-01-687: "Development, optimization and implementation of novel technologies in the molecular and cartographic domains for transgene and herbicide monitoring in Mexico towards an integral strategy and perspective of biosecurity"; and UNAM funded PAPIIT projects number 300515: "A territorial characterization of the contribution of the Mexican society to global environmental change", and number IN302417: "Food security versus environmental protection: design of a national cartographic platform for a multiscale analysis of its compatibility".

Capítulo 5

Enlace de la estructura de los sistemas agrícolas y la seguridad alimentaria rural en México

Linking the structure of the agricultural systems to rural food security in Mexico: an approach using Structural Equation Modeling

J. Mauricio Galeana-Pizaña, Stéphane Couturier, Daniela Figueroa, Aldo Daniel Jiménez

Revista: **Agriculture and food security**; Año de envío: **2020**

Estatus del manuscrito: en revisión de la revista

ABSTRACT

Background: The challenge of food security has become more relevant in global agendas given growing food demands and the persistence of hunger and undernutrition. Due to such needs and complexity of addressing food security, there is considerable interest in identifying major drivers, especially in the case of emerging economies with asymmetric agricultural systems involving smallholder and industrial agriculture.

Methods: The present study proposes a conceptual model to identify how the structure of the agricultural system in Mexico relates to food availability, accessibility, and utilization. Our rural food security conceptual model was tested using structural equation modeling at the national and ecoregion levels. Most variability of the rural food security was explained by food accessibility (the food access index) and by food utilization (entitlement to public health care).

Results: Smallholder agriculture, through small farm size, ejidal land tenure and high crop diversity, significantly corresponds to higher food security in Mexico. However, market commercialization of the production, and irrigation practice, major features of commercial agriculture, significantly correspond to higher food security. The latter finding is likely to explain the higher food security found in Northern ecoregions. Limitations of the model with respect to the milpa traditional cultivation system are discussed.

Conclusions: To this respect, the authors urge the inclusion of agroecological parameters in the future agricultural census. The modeling and analytical approaches employed in this study are proposed to identify and geographically differentiate influences of the agricultural system on food security in emerging countries and can adapt any spatial unit, geographic disaggregation and data type.

Keywords: Rural Food security, Food self-sufficiency, Accessibility, Utilization, Structural equation modeling, Agricultural system, Mexico.

RESUMEN

Antecedentes: El reto de la seguridad alimentaria ha adquirido mayor relevancia en los programas mundiales debido a la creciente demanda de alimentos y a la persistencia del hambre y la desnutrición. Debido a esas necesidades y a la complejidad de abordar la seguridad alimentaria, hay un interés considerable en identificar los principales factores determinantes, especialmente en el caso de las economías emergentes con sistemas agrícolas asimétricos en los que intervienen la agricultura industrial y la agricultura en pequeña escala.

Métodos: En el presente estudio se propone un modelo conceptual para determinar la forma en que la estructura del sistema agrícola de México se relaciona con la disponibilidad, la accesibilidad y la utilización de los alimentos. Nuestro modelo conceptual de seguridad alimentaria rural se probó utilizando modelos de ecuaciones estructurales a nivel nacional y de ecorregión. La mayor parte de la variabilidad de la seguridad alimentaria rural se explicó por la accesibilidad a los alimentos (el índice de acceso a los alimentos) y por la utilización de los alimentos (derecho a los servicios de salud pública).

Resultados: La agricultura a pequeña escala, gracias al pequeño tamaño de las explotaciones, la tenencia de tierras ejidales y la gran diversidad de cultivos aumentan significativamente la seguridad alimentaria en México. Sin embargo, la comercialización de la producción en el mercado y la práctica de riego, características principales de la agricultura comercial, corresponden significativamente a una mayor seguridad alimentaria. Es probable que esto último se explique por la mayor seguridad alimentaria que se observa en las ecorregiones septentrionales. Se examinan las limitaciones del modelo con respecto al sistema de cultivo tradicional de la milpa.

Conclusiones: Los autores instan a que se incluyan parámetros agroecológicos en el futuro censo agrícola. Se proponen los enfoques analíticos y de modelización empleados en este estudio para identificar y diferenciar geográficamente las influencias del sistema agrícola en la seguridad alimentaria de los países emergentes que se pueden adaptar a cualquier unidad espacial, desagregación geográfica y tipo de datos.

Palabras clave: Seguridad alimentaria rural, Autosuficiencia alimentaria, Accesibilidad, Utilización, Modelos de ecuaciones estructurales, Sistema agrícola, México.

Background

Food security is a central challenge in the global agenda for coping with the increase in food demand of 2.2 billion people towards 2050 [1, 2]. An established definition of food security involves access, by all people and at all times, to food of sufficient quantity and nutritional value to lead a healthy and active life [3]. Four components have been documented as being essential for the fulfillment of food security [4]: food availability (which alludes to the balance between the amount of food production and population numbers, and depends on the strength of the agricultural system), food accessibility (which is related to the capacity of households to cover a basic food needs), food utilization (which is the way in which people stay healthy with the food that they consume), and food stability (which considers the sustainability in time of the three other components). In 2018, about 9.2% of the world population were exposed to severe levels of food insecurity, while 17.2% underwent moderated levels of food insecurity; hunger and undernutrition conditions worldwide incremented around 0.2% from 2015 to 2018 [5].

For less industrialized countries, the agricultural sector has traditionally played a central role in the debate on food security and economic welfare [6, 7, 8]. However, the average agricultural productivity in most cases lags as far behind than that of highly industrialized countries [9]. This inefficiency could affect the food security of the emerging economies, in the context ongoing demographic booms, large-scale migration of rural populations into cities [10], and associated increase in food demand and transitions from secondary to tertiary economic activities [11, 12]. Land use changes in these circumstances are a concern for rural sustainable development goals [11, 13]. For instance, a strong debate exists with respect to the massive conversion of forest and agricultural land to grazing land (pasture) in many Latin American countries [14]. Driving this conversion are the short-term economic benefits of cattle ranching for farmers; however these conversions also result in substantial increase in the demand of natural resources and environmental damage. Consequently, the contribution of this activity to regional and global food security is frequently questioned [15 ; 16].

In the case of Mexico, a boom in agricultural production during the 1940 - 1965 period, exceeding by far population consumption, caused "the golden era of agricultural growth" and made the agricultural sector a central feature of the Mexican economy and sovereignty [17, 18]. Later, in the context of the energy crisis of the 1970s as well as dramatic population dramatic increase, food consumption markedly exceeded food production - that had considerably decelerated -, and resulting in increased food imports [17, 18]. Food self-sufficiency became an important institutional goal but diverging public policy strategies have been in dispute since that time to achieve that goal [18]. A key debate sets the view of the agricultural sector as a player in the global market, and associated comparative advantages, against the strategy of focusing on internal markets and increased food self-sufficiency [19]. The proported goal of both strategies is to enhance food security as a whole and with the structure of the agricultural system considered a central parameter to achieving this goal.

The launch of the North American Free Trade Agreement (NAFTA) in 1994 provided a considerable boost to those focused on international markets [20, 21] and triggered discussions of a revolutionary reconfiguration of key agro-commodity production networks following neoliberal reforms in Mexico [22]. This debate has gained increased importance with the global financial crash in 2008. Indeed,

the combined energy and food crisis that followed this crash resulted in an additional 4 million people suffering from food deprivation in Mexico (Instituto Nacional de Salud Pública). A series of direct subsidies has been since implemented with the aim of guaranteeing access to the basic food needs. For example, in 2013, the program “Crusade against Hunger” was launched by the Federal Government [18]. During this campaign, extremely marginalized populations were targeted with subsidies to increase local crop production and food supplies [23]. Ongoing conversion of land to crops for export has continued to increase (as had been the case since 1994), together with food export volumes continued to increase [24]. In 2019, a new administration that openly promotes agricultural self-sufficiency, created a decentralized agency for Mexican Food Security (Spanish acronym SEGALMEX). Associated constitutional mandates establish that the federal government is responsible for ensuring the access to sufficient quantity and quality of food, providing sufficient food supplies for the entire population, promoting agricultural activities among the most vulnerable groups, as well as guaranteeing the well-being of the peasant population through integral and sustainable development and their incorporation into national social development strategies [25].

Considering the above, and the inevitability of additional major financial crises such as the that which occurred in 2008, there is much public interest for an optimum understanding on the relationship between agricultural systems and rural food security, especially characteristics of the agricultural system that would undermine or strengthen food security among rural populations [26, 17]. At the household level, rural food security has been understood as the ability of a household to secure enough food to ensure adequate dietary intake of socially acceptable foods for all its members [27]. Food insecurity has been estimated in Mexico by the National Institute of Public Health using perception surveys along the Latin American and Caribbean Food Security Scales [28, 29]; many quantitative studies have focused on relating food (in)security to malnutrition using epidemiological methods [30, 31, 32, 33, 34]. Socio-economic conditions such as income and educational levels have also been tested as correlates to estimates of food (in)security in the country [35, 28]. On the other hand, the influence of the agricultural production system on food security has long been acknowledged [15, 36, 37, 33, 38]. To the best of our knowledge, however, no attempt has been made to build a model where agricultural system variables together with socio-economic and health variables are quantitatively and simultaneously studied with respect to the state of food security in Mexico. In this respect and given the interrelated and multidimensional aspects of food security, structural equations modeling facilitates the construction of a multiple path conceptual model based on relationships detected in past studies, and testing of the strength of the relationships of a group of variables of interest within the same model [4, 39].

In this research, we propose a model for food security in Mexico incorporating availability, accessibility and utilization aspects of food security. Additionally, in order to offer quantitative insights and complements to previous research on drivers of food (in)security, this study addresses the following questions:

Does the presence of smallholder agriculture systems relate to better food security? More specifically, what features of smallholder agriculture relate to better food security? Is this relationship true nationally or just for specific ecoregions in Mexico? Alternatively, is the presence of commercial agriculture associated with better food security? More specifically, what characteristics of the agricultural system in Mexico are related to a better food security?

Based on the most disaggregated and detailed agricultural census in Mexico, we propose to study the relationships between the agricultural system and food security using structural equations modeling. Drawing from a previous study on trends of food security and agricultural expansion in Mexico, the study is implemented at national and ecoregion levels as the structure of the agricultural system may vary significantly across ecoregions [15]. Our objectives were to:

- 1) Identify the factors within the agricultural system which have the strongest relationships with food security.
- 2) Differentiate the pattern of strongly related factors per ecoregion.
- 3) Identify a possible set of drivers for each components of food security, with an emphasis on the agricultural system.

Our proceeds as follows. The next section describes the proposed conceptual framework for rural food security in Mexico. Section 3 describes the data and methods of the study from which quantitative results are derived in section 4. Finally, an interpretation in terms of drivers of rural food security is explained in the conclusion section.

The structure of the agricultural system and rural food security

The agricultural system is structured according to its main physical, biotic, economic and sociocultural components [40, 41]. Smallholder agriculture is an essential feature of the Mexican agriculture system, as is the case in many emerging economies [6]. A traditional form of smallholder agriculture is subsistence agriculture; whose major feature is the producer using all or a significant proportion of the yield for the consumption of his/her household. This type of agriculture in Mexico (called the milpa cultivation system) is characterized by small parcel sizes (<5 ha), self-consumption of the crops, rain-fed cultivation practice, communal or ejidal (a mixed form between communal and private) land tenure and high crop diversity [42]. This type of agriculture has been shown to have a positive impact on rural food security because it provides direct access to food and resilience in spite of the low income situation of rural families [43, 44, 45], and appears in a range of local / regional case studies [42, 46, 47]. By contrast, commercial agriculture (cash crop cultivation) is another, distinct component of the agricultural system. Commercial agriculture contributes to food security because by supporting high urban demand and provides greater income to rural families [7, 48]. This type of agriculture is generally characterized by medium to large parcels (>5 ha), the commercialization of the entire yield, irrigation, private land tenure, and a low crop diversity. Due to globalization and public agricultural policies, as well as environmental conditions, the distribution of the two above mentioned forms of agriculture have taken very different proportions in the distinct ecoregions of Mexico (see figure 1) [15]. For example, much of the North American Deserts and Southern semi-arid highlands in Mexico have been turned to irrigated monocultures because of the incentives to serve as food supply to the major cities of the urban system. Likewise, much of the Mediterranean Californian and Great Plains ecoregions, as well as parts of the Tropical Dry, Tropical Wet and Temperate Sierras ecoregions, have been converted to irrigated vegetable crops for exportation [18].

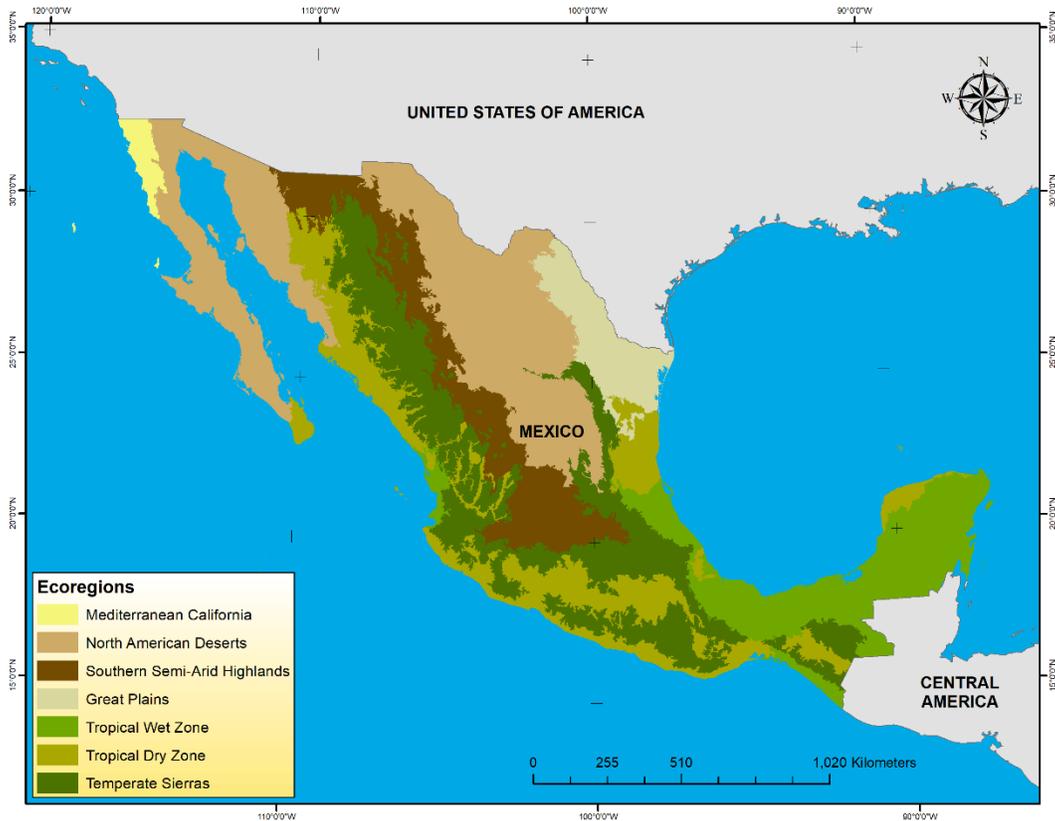


Figure 1. Ecoregions of Mexico.

Moreover, some other structural features of smallholder production units have been reported to be related to food security. For example, the income type of rural households possibly has an effect on food access, because economic diversification (through the combination with non-agricultural activities) have been a necessity for decades to cope with prevailing low prices of produces in the agricultural sector [49, 50]. In the same way as economic diversification, crop diversity may improve food utilization through ensuring nutrient hotspots and sustainable multifunctional landscapes [7, 42, 46]. Finally, an interesting debate exists with respect to the proximity to natural ecosystems: does their conservation favor the quality of local food supply instead of the conversion of land and corresponding expansion of crop and livestock production systems? [51, 15, 52, 53, 54].

Additional factors have been documented as being directly related to food security in Mexico, including access to and the utilization of food resources. For example, greater road density may provide better access to food although it is difficult to make a precise characterization due to variation in the availability of transport, road condition, and travel patterns affected by the location of residences and the workplace [55]. Finally, the education level of households may also be an important contributor to food security altogether [56]. Both variables (road density and education level) were incorporated as complements to agricultural system variables in our framework, because they are potentially strong drivers to the access and utilization aspects of food security.

Based on the review of variables described above used in past studies, we propose an empirical model for rural food security in Mexico (figure 2). The model strives to reveal the best correlates to the rural food security concept (described as a latent - non measured - variable on the right hand side of the diagram) through the intermediate concepts of food availability, food accessibility and food utilization, three of the four pillars of food security [57, 58]. The fourth pillar (food stability) has been considered an important aspect in conceptual models of food security in sub-Saharan Africa [4] due to recurrent economic and political instability at the country level in this region. However, we did not find an appropriate subnational equivalent to model food instability in our case.

Our conceptual model hypothesizes a strong correlation between variables selected a priori (shown in the left hand column of the diagram in figure 2), and key aspects of food security, represented by their own variables (middle section of the diagram). The diagram in figure 2 uses the conventions from path analysis [59]. The set of correlated variables are found with the technique of structural equations (see methods section), in the same way as in recently established models on food security [39, 4]. Likewise, the spatial coverage and availability of data were determinant factors for the operationalization of our model in Mexico. The results offered by the structural equations model (the set of variables found as strongly correlated) are expected to help making interpretations on drivers of the concept under study, in the perspective of assessing public policies.

A Food Self-sufficiency Index (FSI) estimated food availability, as the balance between production and consumption of the major staples and livestock (see section 3.3); Food accessibility was approximated using the inverse of the Marginalization Index (MI), an official Mexican index of poverty derived from income level and housing conditions [60] further explained in the following section. Both proxies FSI and MI were used in a previous study on food security in Mexico [15]. Food utilization was approximated using two variables: the proportion of the population entitled to a major public health care system, on the one hand, and the infrequency of diseases related to undernutrition registered in local hospitals, on the other hand. We describe the variables of the first column of the diagram and their specific measure in the following section on data and methods. The model is proposed in this research as a multiple path diagram involving predictor variables (on the left-hand side) and food security proxies (three major aspects of food security: food availability, accessibility and utilization). Rural food security is the ultimate, latent variable of the model (on the right-hand side). The principal goal of this model is to seek prevalent relationships between the structure of the agricultural system (represented by most variables on the left-hand side) and rural food security.

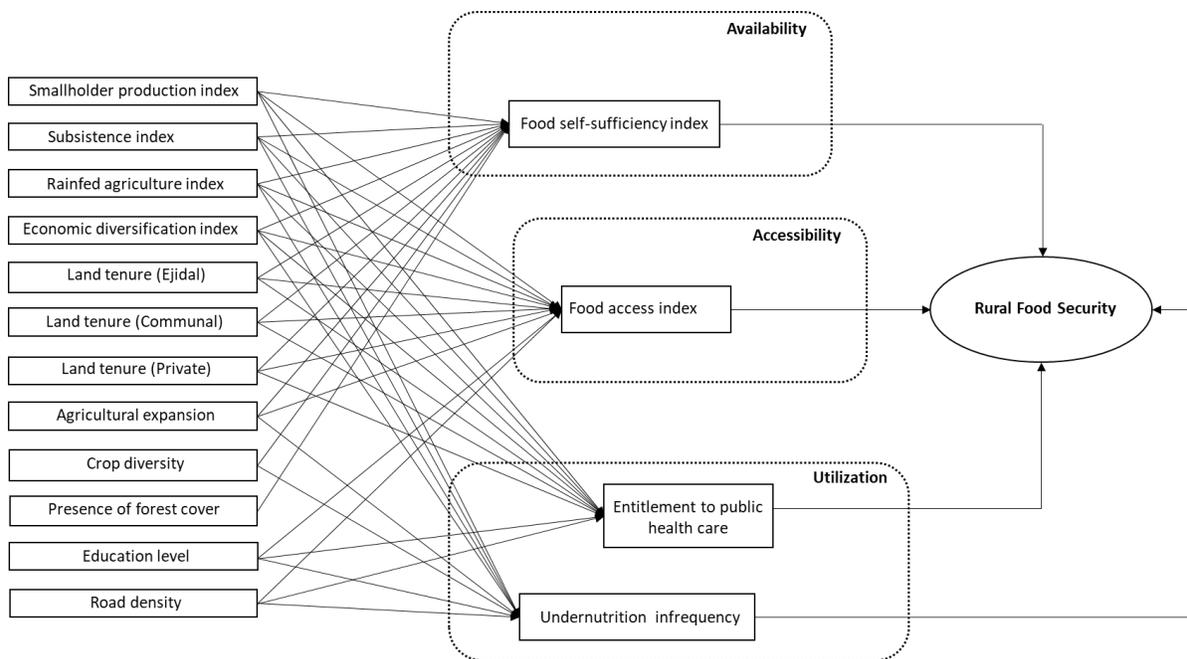


Figure 2. Conceptual model of rural food security in Mexico.

Methods

Structural equation modeling (SEM)

Understanding systems, for example food systems, requires the ability to simultaneously examine factors influencing the model and those describing model. Conventional univariate and bivariate analyses, also called first-generation techniques, are typically limited to examining only one, or at most, a couple of processes at a time. To try and overcome some limitations of first-generation methods, many researchers have increasingly turned to second generation techniques [61] over the past 20 years. Structural equation modeling (SEM) combines factor analysis with linear regression to test the degree of adjustment of observed data to a hypothetical model that is expressed by means of a diagram or mental map [61]. Structural equations typically occur in multivariate statistical tool, also known as covariance structure analysis, which allows testing of the relations or associations (not necessarily causality) that exists between variables [59]. SEM has been widely used in research on psychology, education and administration / marketing [62, 63], but have also proven useful in other disciplines, including wildlife management [64], communication sciences [65], spatial analysis [66], ecology [67], and recently in disciplines that address global issues, including food security [39, 4, 68]. A major goal of this study is to develop and test a conceptual model of rural food security, investigating the associations with agricultural system variables.

SEM does not necessarily begin with a null hypothesis to be tested, instead it constructed based on the set of available knowledge and variables. In a first step, a set of a priori specifications is applied (see the variables and relationships in figure 2). The observed variables represent the data that have been collected in measurements and can be categorical, ordinal or continuous. By contrast, latent variables generally correspond to constructs or hypothetical factors (in our model, the construct of

the food security concept, on the right-hand side of figure 2), and are supposed to reflect a continuum that is not directly observable [59]. The a priori specifications reflect the “hypotheses” and the predictor variables (column on the left-hand side of figure 2) of the SEM to be analyzed [69]. In a second step, SEM involves the computation of covariances, coefficients and the fit of the model.

The computation of observable variables is explained in the next subsection. The components of the system under study (food security) constitute the second column of the diagram (central column of figure 2) and are reviewed in subsection 3.3. Finally, subsection 3.4 treats the computation of coefficients and model fit.

Predictor Variables

The twelve predictor variables of the Structural Equation Model (figure 2) include ten characteristics of the agricultural system: 4 categorical variables (smallholder index, subsistence index, rainfed agriculture index, economic diversification index, described in table 1a) and 6 continuous variables (three common system pool variables, crop diversity, agricultural expansion, and presence of forest cover, described in table 1b). Three of the four categorical variables are derived from the latest Mexican National Agricultural, Livestock and Forestry census (hereafter referred as the "agricultural census") [70]. This census, conducted in 2007, is the latest detailed source of information available nationwide that permits characterization of the structural characteristics of all production units in Mexico. The smallest spatial unit of the census is the rural neighbourhood or control area (INEGI, 2007a; mean size of 1021 hectares), defined as a "surface whose contours are recognizable physical features in the field, and characterized by a relatively homogeneous land use and land tenure" [70]. The remaining categorical variable (rainfed agriculture index) is derived from the official INEGI national-level maps of land use and vegetation cover (LUVIC INEGI maps; 1:250,000 scale) for 2007 [71]. The INEGI cartography is considered the most reliable and comprehensive data source in terms of agricultural land use, specifically for the distinction between rainfed and irrigated land. Of the six continuous predictor variables, four were derived from the 2007 agricultural census (the common system pool variables and crop diversity), while two were derived from the 2007 (agricultural expansion from the 2007 and 2014) [72] LUVIC INEGI maps, and the presence of forest cover from the 2007 maps). Agricultural expansion was mostly land converted to extensive, commercial agriculture and cattle grazing [15]. The information of the latter variables was aggregated at the rural neighbourhood level.

Apart from the variables associated with the structure of the agricultural system described in Table 1a & table 1b, density of roads and education level were considered predictor variables in the SEM model. The road density was computed using the kernel density value of the National Road Network 2017 from the Ministry of Communications and Transports in Mexico [73]. The education level was extracted from the population and housing census of 2010 [74]. For both variables, the information was aggregated to the rural neighbourhood level.

Table 1a. Categorical predictor variables of the agricultural system.

Name of the variable	Definition & source	Categories	Categorical value	Previous food security studies using the variable
Smallholder index	Mean size of the agricultural plot (ha) per farmer. Derived from INEGI (2007a).	1) Very small (< 2 ha);	1	Samberg et al. (2016)
		2) Small (2-5 ha);	0.8	
		3) Medium (5-15 ha);	0.6	
		4) Large (15-50 ha);	0.4	
		5) Extensive grazing (>15ha, and pasture area >90%).	0.2	
Subsistence index	Predominant destination type / marketing channel of the farmer's production. Derived from INEGI (2007a).	1) Subsistence;	1	Gómez Oliver (2017) & FAO-SAGARPA (2012)
		2) Market commercialization,	0.75	
		3) Mixed (Subsistence & Market commercialization),	0.5	
		4) Business.	0.25	
Rainfed agriculture index	Predominance of cultivation or pasture system and predominant water management type for cultivation systems (based on the largest surface per spatial unit). Derived from INEGI (2014).	1) Rainfed system	1	
		2) Mixed (Rainfed-irrigated systems)	0.75	
		3) Irrigated system	0.5	
		4) Pasture	0.25	
Economic diversification index	Predominant source of income (agricultural activity versus other sources such as remittances from the United States, service activities and public assistance programs. Derived from INEGI (2007a).	1) Pluri-active (non-agricultural activities)	1	Schneider (2014)
		2) Mixed (agricultural and non-agricultural)	0.66	
		3) Specialized (agricultural activities)	0.33	

Table 1b. Continuous predictor variables of the agricultural system.

Name	Definition & source	Value range	Previous food security studies using the variable
Common system pools	“Ejidal” land tenure	Percentage “Ejidal” surface in the rural neighbourhood. Derived from INEGI (2007a)	0-1
	“Comunal” land tenure	Percentage “Comunal” surface in the rural neighbourhood. Derived from INEGI (2007a)	0-1
	Private land tenure	Percentage of Private land in the rural neighbourhood. Derived from INEGI (2007a)	0-1
Crop diversity	Shannon index applied to the number of crops and associated areas. Derived from INEGI (2007a)	0-1	Herrero et al., 2017
Agricultural expansion	Proportion of the land converted to agricultural land in the rural neighbourhood. Derived from INEGI (2007b, 2014)	0-1	
Presence of forest cover	Proportion of natural ecosystems in the rural neighbourhood. Derived from INEGI (2014)	0-1	

Food Security Proxies

Food availability

Food availability can be approximated by food self-sufficiency, comparing the amount of food production to the amount of food consumption [15, 19]. Food production was estimated using the annual yields of major crops and livestock made available in the agricultural census [70]. Maize, wheat, rice and bean were the main crops considered in this study, and bovine and porcine the major livestock categories, because of their strategic value for food security and sovereignty in Mexico and they are listed in the Mexican Law of Sustainable Rural Development [78]. Average per capita consumption of the selected crops and livestock is provided by the National Chamber of Transformation Industries [79] (Table 2). This consumption value was multiplied by the population numbers registered in the demographic census of 2010 [74] for each rural neighbourhood of the agricultural census. The food consumption pattern was differentiated according to the population size of the locality based on the thresholds proposed by [79]. Finally, the food self-sufficiency indicator (FSI) was estimated per rural neighbourhood as the normalized difference between food production and food consumption [15]:

$$FSI = \frac{(Production - Consumption)}{Consumption}$$

Table 2. Per capita food consumption (kg/year) per locality size in Mexico [78].

Crop/livestock type	Locality size: < 2,500 inhabitants	2,500 to 14,999 inhabitants	15,000 to 99,999 inhabitants	100,000 or more inhabitants
Maize	85.48	85.41	70.84	54.02
Wheat	13.17	14.85	14.92	16.49
Rice	5.07	4.85	4.05	3.54
Bean	11.24	9.85	8.10	5.43
Bovine	5.11	7.88	9.30	10.43
Porcine	4.96	7.66	8.32	8.10

Food accessibility

Food accessibility can be approximated by the capacity of households to purchase diverse and sufficiently nutrient rich food. The relationship between poverty (or marginalization) and insufficient consumption of food has been acknowledged internationally [80], and the marginalization index (MI) developed by the National Population Council in Mexico [60] has been the major criterion of Mexican federal programs for the alleged goal of incrementing food access (e.g. the aid programs DICONSA and PROCAMPO). To support this view, it is argued that 80% of the rural families associated with high and very high marginalization, have an income equal to or lower than the threshold of food poverty [81]. Important qualitative aspects of food access such as highly nutritious traditional cultivation as well as hunting and gathering activities in high and very high marginalization rural neighbourhoods may not be reflected in MI; however, in spite of critiques from the scientific community [46, 15], the inclusion of such important subsistence features of the agricultural system in the census has still not been planned by Mexican public administrations. For the purpose of this research, the population weighted average of MI (year 2010) was computed at the rural neighbourhood level, and a food access index was computed as the inverse of the resulting MI.

Food utilization

Two public health factors have been related to the food utilization aspect of food security. The first one is access to public health care. Indeed, features of food utilization such as breastfeeding, appropriate weaning practices, nutritional education and prevention of micronutrient deficiencies are promoted and supported by public health care infrastructures in rural areas [82]. The other factor is the frequency of undernutrition measured through enterogastric related sicknesses in public hospitals. Access to public health care was approximated to the percent population entitled to the public health care systems in Mexico (INEGI demographic census of 2010 at locality level). Regarding the other factor, an undernutrition infrequency index was derived from the national statistics of the Ministry of Health, combining the morbidity and sickness records and associated diseases. This information was collected for the period 2007 – 2017 at locality level from the Health Information of Mexico (<http://www.dgis.salud.gob.mx>) and processed for its spatial representation. A prevalence proportion of cases with respect to total population was then generated at rural neighbourhood level. The undernutrition infrequency index equated to the inverse of the prevalence proportion in a rural neighbourhood.

Application and fit of the Structural Equation Model

A Structural Equation Model (SEM) is a normal theoretical model, i.e. multivariate normality is assumed for the population distribution of the endogenous variables [61]. Eight SEM models were built using the LAVAAN R package [83]: one at the national level and seven at ecoregion level. Our spatial unit was that of the agricultural census (“área de control” in Spanish); all spatial units with non-null rural population were included (a total of 68,323 observations at the national level).

First, the bivariate covariance, defined as follows for 2 continuous variables x and y , was computed as the basic statistics of SEM:

$$COV_{xy} = r_{xy}SD_xSD_y$$

Where r_{xy} is the Pearson correlation coefficient and SD_x and SD_y are their standard deviations [59].

Then, non-standardized and standardized coefficients were calculated using the maximum likelihood estimator, picking out the variables that maximize the likelihood that the data (the observed covariances) were extracted from a target population of data.

Finally, our hypothetical conceptual model was assessed through the fit of SEM to the data. A good-fitting model is one that is reasonably consistent with the data and does not require re-specification. This fit was tested using the p-value of a Chi-square test, root mean square error of approximation (RMSEA) and comparative fit index (CFI), which are three widely applied metrics to assess SEM [84].

Results and Discussion

The heterogeneity of the Mexican agricultural system

Some of the heterogeneity of the agricultural system in Mexico can be captured through the basic descriptive statistics of structural variables per ecoregion (table 3). In all ecoregions but the Mediterranean California, rural neighborhoods are characterized by the prevalence of subsistence agriculture production units. However, only in ecoregions extending to the South is the rainfed agriculture practice prevalent. By contrast, a mixed (rainfed - irrigation) practice is prevalent in the mostly Northern ecoregions (the Great Plains, the Northern American Deserts and Mediterranean California). The Northern American Deserts ecoregion distinguishes itself by small parcels and a diversified economic strategy with respect to the other mostly Northern ecoregions. Among ecoregions distributed in the South of the country, Temperate Sierras is distinguished by a majority of very small parcels, the Tropical Dry Zone sticks out with a strong emphasis on specialized agriculture, and the Southern Semi-Arid Highlands is characterized by a widespread private land tenure (62% average); finally, the expansion of extensive agricultural land has been especially marked in the Tropical Wet Zone. In terms of food security, a divide is notable between ecoregions that extend to the South and ecoregions confined to the North (table 3): for the latter, food access and food utilization tend to be better (lower marginalization and higher entitlement to public health care, respectively).

Table 3. Descriptive statistics of the variables involved in the Structural Equation Model.

Descriptive statistic of the variables	Mexico	Great Plains	North American Deserts	Mediterranean California	Southern Semi-Arid Highlands	Temperate Sierras	Tropical Dry Zone	Tropical Wet Zone
Number of observations ("Áreas de control", agricultural census)	68,323	2,885	5,532	285	13,144	15,824	14,817	15,836
Predictor variables								
Smallholder index (majority)	Small	Medium	Small	Medium	Small	Very small	Small	Small
Subsistence index (majority)	Subsistence	Subsistence	Subsistence	Market commercialization base	Subsistence	Subsistence	Subsistence	Subsistence
Rainfed agriculture index (majority)	Rainfed systems	Mixed (Rainfed-irrigated systems)	Mixed (Rainfed-irrigated systems)	Mixed (Rainfed-irrigated systems)	Rainfed systems	Rainfed systems	Rainfed systems	Rainfed systems
Economic diversification index (majority)	Specialized	Mixed	Pluriactive	Mixed	Mixed	Mixed	Specialized	Mixed
Ejidal land tenure (Average proportion)	0.34	0.26	0.39	0.59	0.30	0.30	0.36	0.40
Communal land tenure (Average proportion)	0.04	0.00	0.02	0.03	0.01	0.08	0.04	0.03
Private land tenure (Average proportion)	0.49	0.81	0.68	0.83	0.62	0.45	0.45	0.35
Crop diversity (Average index)	0.45	0.41	0.44	0.42	0.47	0.45	0.41	0.46
Agricultural expansion 2007-2014 (total, ha)	2,049,649	83,208.5	234,044.3	7,145.36	174,226.65	294,365.1	480,461	776,198.1
Presence of forest cover (total, ha)	62,620,162	1,772,712	3,324,722	2,130,879	3,324,722	12,567,737	15,090,669	10,009,397
Road density (Average density index)	0.20	0.18	0.21	0.10	0.27	0.22	0.24	0.10
Education level (Average)	3.6	2.19	2.95	2.55	3.88	4.1	3.25	3.69
Food security proxies								
Food self-sufficiency indicator	0.10	0.11	0.45	0.16	0.13	0.02	0.08	0.04
Food access index (majority)	Low	Medium	Medium	Medium	Low	Low	Low	Low
Entitlement to public health care (% inhab)	75.4	90.7	86.7	91.3	77.8	68.6	76.3	72.6
Undernutrition infrequency (%)	83.4	95.1	80.4	100	87	83.8	76.9	84.6

SEM model fit at national and ecoregion levels

The tests of all Structural Equation Models indicated an acceptable fit (see table 4); All models were statistically significant according to the Chi-square test. CFI values exceeded 0.9 and RMSEA values were below 0.08, which is associated with an acceptable adjustment [85, 86]. Moreover, RMSEA were below 0.06 for the national level as well as for the Great Plains, the Southern Semi-Arid Highlands and Mediterranean California, which according to [87] is associated with a good fit.

Table 4. Values of fit of all Structural Equation Models (national and ecoregion models).

Level	Number of observations	P-value (Chi-square)	Comparative Fit Index (CFI)	Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA)
Temperate Sierras	15,824	0,000***	0.907	0.063
Tropical Dry Zone	14,817	0,000***	0.902	0.078
Tropical Wet Zone	15,836	0,000***	0.905	0.066
Great Plains	2,885	0,000***	0.983	0.057
Southern Semi-Arid Highlands	13,144	0,000***	0.922	0.052
North American Deserts	5,532	0,000***	0.919	0.065
Mediterranean California	285	0,000***	0.999	0.027
Mexico	68,323	0,000***	0.936	0.049

With the assumptions of the proposed conceptual model (figure 2), the result of the SEM method yielded generalized relationships for each model (at national and ecoregion levels). At national level, these generalized relationships are illustrated in figure 3; positive and significant relationships linked each aspect of rural food security to the latent food security variable. The direction of these relationships (positive sign of the coefficients) was consistent with the theoretical expectations that were reflected in the conceptual model. The resulting path diagrams of each ecoregion can be found in the additional files.

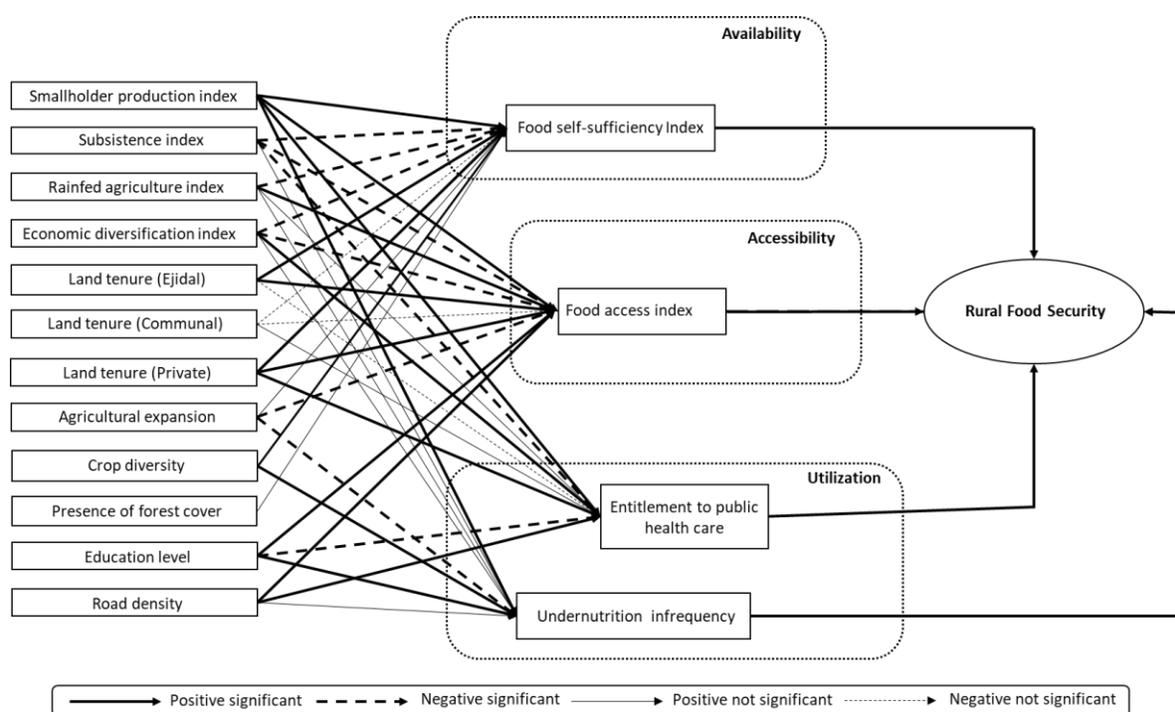


Figure 3. Path diagram and significance of the generalized relationships in the Structural Equation Model

At ecoregion level, although the relationships remained positive, some food security aspects did not present significant relationships with the proposed predictor variables (see table 5): this was the case of undernutrition infrequency for the Tropical Wet Zone and the Southern Semi-Arid Highlands, as well as food self-sufficiency for the Northern American Deserts. The food security proxy “Entitlement to public health care” had the greatest weight in the model explaining rural food

security at national level and in all ecoregions except in the Great Plains and the Tropical Dry Zone, where food access had the greatest explanatory power (table 5). Additionally, the models of the Great Plains and of Mediterranean California could not be fully tested because there was no occurrence of undernutrition in the official statistics.

Table 5. Standardized maximum likelihood coefficients linking food security aspects to the food security latent variable.

Endogenous Observed Variables	Mexico		Temperate Sierras		Tropical Dry Zone		Tropical Wet Zone		Great Plains		Southern Semi-Arid Highlands		North American Deserts		Mediterranean California	
	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs
Food self-sufficiency index	0.10 ***	0.61	0.50 ***	0.20	0.10 *	0.52	0.20 ***	0.87	0.60 ***	0.19	0.20 ***	0.89	0.10	0.21	0.6	0.57
Food access index	0.21 ***	0.97	0.15 ***	0.71	0.26 **	0.13	0.98 ***	0.62	0.64 ***	0.25	0.11 ***	0.47	0.63 *	0.25	0.18	0.62
Entitlement to public health care	0.51 ***	0.20	0.83 ***	0.30	0.41 *	0.16	0.76 ***	0.28	0.60 ***	0.39	0.46 ***	0.21	0.72 *	0.40	0.7	0.52
Undernutrition infrequency	0.10 ***	0.26	0.10 ***	0.40	0.10 *	0.20	0.10	0.18	-	-	0.10	0.90	0.20 *	0.61	-	-

Signif. Codes: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 0.1 '.' 1 '' 1

Generalized relationships between predictor variables and food security aspects

Among all criteria to assess aspects of rural food security, the unstandardized maximum likelihood coefficient captures the relative influence (weight) of each predictor variable on the model and the direction (sign) of this influence (tables 6-9). Accordingly, the major influence patterns of the predictor variables are summed up in the following paragraphs.

Predictors of food availability

A positive and highly significant coefficient characterizes the smallholder and crop diversity indices in the food self-sufficiency index (FSI) model (see table 6) in most cases. In general, smaller farms and higher crop diversity (strong attributes of agrobiodiverse smallholder agriculture) both significantly correspond to a better food availability. Moreover, the rainfed agriculture practice is also related to high FSS in the Temperate Sierra ecoregion. By contrast, negative and highly significant coefficients characterize rainfed agriculture at the national level and in Mediterranean California. Likewise, at national level and in most ecoregions, the coefficients characterizing the subsistence index are significantly negative, indicating that more rainfed agriculture and more subsistence parcels (two important attributes of smallholder agriculture) generally coincide with less FSS.

Next, the relationship of common pool (land tenure) variables with respect to food self-sufficiency is not easy to interpret at national level since both ejidal and private land tenure exhibit positive and significant coefficients, but their relative influence can be distinguished per ecoregion: The coefficient of ejidal land tenure is positive and significant in the Temperate Sierra and in the North American Deserts whereas the coefficient of private land tenure is positive and significant in the Tropical Wet Zone and in the Great Plains.

Economic diversification, often pointed out as a beneficial management strategy to agricultural households, seems adverse to food self-sufficiency in many cases: the economic diversification index is negative and significant at the national level and in the Altiplano ecoregions (Temperate Sierras, Southern Semi-Arid Highlands and Northern American Deserts).

Agricultural expansion, an important feature of extensive commercial agriculture, turns out to be in favor of food self-sufficiency only in one ecoregion: The Southern Semi-Arid Highlands (an ecoregion covered with extensive bushlands). At national level and in other ecoregions, the agricultural expansion variable has been found non-significant. Interestingly, this result suggests that the extensive increment of agricultural land at the expense of natural ecosystems at national level does not boost rural food security, as found in an earlier study [15]. A primary consideration in the determination of cropping pattern and amounts to be marketed among smallholders is to first guarantee food self-sufficiency (Valdes, 2019). This result also supports the idea of land demand for food production based on agro-ecological farming systems to sustain biodiversity and avoid extensive ecosystem degradation [53, 54].

The presence of forest cover, valued as a strong feature of ecofriendly agricultural practices and sustainable agroforestry, has not shown significant in terms of food self-sufficiency in this study. A significant portion of agricultural and forest products derived from traditional agriculture and agroforestry practices might fall out of the basic crop needs considered in the food self-sufficiency index. This, together with a limited productivity of these practices in extensive areas of eroded soils, could contribute to explain its poor relationship with food self-sufficiency.

Predictors of food accessibility

For the food access (FA) model (see table 7), a positive and highly significant coefficient characterizes the smallholder and economic diversification indices in most cases; Hence, smaller farms and higher economic diversification of activities (strong attributes of smallholder agriculture) generally correspond to a higher food accessibility, confirming perhaps some of the benefits associated with pluri-activity in agricultural dynamics [88]. Economic diversification also relates to income sources such as national and international remittances from migrant family members, and to government assistance programs. In contrast, the coefficient of the agricultural expansion variable is negative and highly significant at the national level, in the Temperate Sierras, and in the Tropical Wet Zone. Thus, extensive agricultural expansion, a historical banner of national policies focused on the increment of agricultural production, especially in the Tropical Wet Zone, seems to be detrimental to rural food access, as was already observed in another study [15].

The subsistence and rainfed agriculture indices are characterized by highly significant negative coefficients in most cases, indicating that more rainfed agriculture and more subsistence parcels generally coincide with lower food accessibility. These two important attributes of smallholder agriculture could therefore be detrimental to the accessibility aspect of food security. This trend seems to reflect correlations between low cost agricultural practices and the lack of monetary income (marginalization index). Some important aspects of food accessibility, though, are overlooked using our income-based food access index; indeed, non-monetary benefits such as high quality agroecological cultivation and direct access to a diversity of fauna and flora in the field. This shortcoming of the FAI could mitigate some of the apparent antagonism between subsistence agriculture and food accessibility found in this study.

The land tenure variables behave similar with food accessibility as with food self-sufficiency; Significant positive coefficients are obtained for ejidal and for private land tenures at national level. However, their influence changes from one ecoregion to another. For example, in the Southern Semi-Arid Highlands, a significant and positive relationship holds for ejidal land tenure whereas in the North American Deserts, this same relationship is observed for private land tenure. Finally, in this sub-model, variables that are not directly linked to the structure of the agricultural system (education level and road density) exhibit a positive and highly significant coefficient. In the case of education level, this result is in line with marginalization studies and associated lack of formal education.

Predictors of food utilization

Two sub-models (entitlement to public health care (EPHC), see table 8; and undernutrition infrequency (UI), see table 9) provide insights on food utilization. In the EPHC, a positive and highly significant coefficient characterizes the smallholder and economic diversification indices nationally as well as for the Southern ecoregions, where smaller farms and higher diversification of activities (strong attributes of smallholder agriculture) generally correspond to a higher entitlement to public health care. Likewise, the smallholder and crop diversity indices exhibit a positive and highly significant coefficient in most cases, reflecting a high influence on UI. It was previously documented that smallholder farmers are less affected by undernutrition prevalence [7, 43]. In the UI model, by contrast, the coefficient of the agricultural expansion variable is negative and highly significant at the national level and in most ecoregions. Thus it seems that a large agricultural expansion also corresponds to low levels of food utilization. It is noteworthy that the negative weight of agricultural expansion reaches out to the highest explanatory power than the entire set of predictor variables (standard coefficient of -0.94).

Additionally, high road densities and high education levels are significantly associated with a high EPHC and a high UI, respectively. Despite the above devised characteristics of smallholder agriculture seem to correspond to better food utilization, the subsistence index, also an important attribute of smallholder agriculture, is negatively related to the entitlement to public health care (EPHC). Also, private land tenure is positively related to EPHC at the national level and for mostly Southern ecoregions.

Finally, the coefficients of the education level variable are negative and highly significant in the EPHC model's explanation for all ecoregions and at national level. This result is, at first glance, in principle counterintuitive since rural household conditions are simultaneously associated with lower education and low access to health care. However, since 2005, a Popular Insurance ("el Seguro Popular") program, within the public health care scheme, was launched, aiming almost exclusively at the remote rural population with low education and income levels [89]. This finding could thus reflect the extended Popular Insurance coverage of the very low income portion of the rural population.

Table 6. Standardized and unstandardized maximum likelihood coefficients of the Structural Equation Models linking predictor variables to food availability.

Exogenous Observed Variables	Mexico		Temperate Sierras		Tropical Dry Zone		Tropical Wet Zone		Great Plains		Southern Semi-Arid Highlands		North American Deserts		Mediterranean California	
	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs
Smallholder production index	0.30 ***	0.45	0.18 ***	0.13	0.10 **	0.25	0.40 ***	0.60	0.14 ***	0.91	0.60 ***	0.51	0.13 ***	0.79	0.03	0.07
Subsistence index	-0.10 ***	-0.30	-0.30 ***	-3.50	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.04	0.03	-0.20 ***	-0.32	-0.90 ***	-0.69	-0.02	-0.05
Rainfed agriculture index	-0.10 ***	-0.18	0.30 ***	0.38	-0.10 *	-0.17	-0.01	0.00	0.30 *	0.34	-0.10 *	-0.15	-0.02	-0.02	0.41 **	0.15
Economic diversification index	-0.10 *	-0.80	-0.20 ***	-0.17	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.07	-0.10 *	-0.17	-0.40 *	-0.28	0.01	0.02
Land tenure (Ejidal)	0.31 ***	0.35	0.32 ***	0.22	0.09	0.06	0.04	0.00	-0.31	-0.11	0.02	0.01	0.17 ***	0.99	0.10 *	0.15
Land tenure (Communal)	-0.07	-0.04	-0.08	-0.04	-0.09	-0.02	-0.03	0.00	-0.06	-0.04	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	0.06	0.02
Land tenure (Private)	0.11 ***	0.19	0.05	0.05	0.04	0.08	0.46 ***	0.34	0.56 **	0.57	0.01	0.02	0.00	0.00	0.04	0.01
Agricultural expansion	0.01	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.03	0.05	0.01	0.02	0.04	0.31 ***	0.49	-0.16 *	-0.22	-0.12	-0.12
Crop diversity	0.20 ***	-0.18	0.70 ***	0.38	-0.01	-0.05	-0.01	-0.01	0.02	0.09	0.00	0.01	-0.10 ***	-0.56	0.05	0.08
Presence of forest cover	0.07	0.06	0.04	0.04	0.05	0.07	0.06	0.01	0.08	0.02	0.00	0.00	-0.02	-0.02	0.21 ***	0.30

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.'1

Table 7. Standardized and unstandardized maximum likelihood coefficients of the Structural Equation Models linking predictor variables to food accessibility.

Exogenous Observed Variables	Mexico		Temperate Sierras		Tropical Dry Zone		Tropical Wet Zone		Great Plains		Southern Semi-Arid Highlands		North American Deserts		Mediterranean California	
	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs
Smallholder production index	0.87 ***	0.85	0.12 ***	0.11	0.33 ***	0.34	0.47 ***	0.72	-0.39	-0.33	0.21 ***	0.14	0.03	0.02	-0.48	-0.38
Subsistence index	-0.72 ***	-0.85	-0.80 ***	-0.10	-0.99 ***	-0.13	-0.35 ***	-0.54	0.05	0.05	-0.37 ***	-0.40	-0.98 ***	-0.99	-0.30	-0.24
Rainfed agriculture index	-0.26 ***	-0.46	-0.01	-0.01	-0.38 ***	-0.73	-0.07 *	-0.19	-0.37 **	-0.57	-0.24 ***	-0.36	-0.18 ***	-0.26	-0.20	-0.26
Economic diversification index	0.51 ***	0.50	0.55 ***	0.63	0.60 ***	0.56	0.14 *	0.18	0.11 ***	0.12	-0.36 ***	-0.31	0.49 **	0.42	0.05	0.06
Land tenure (Ejidal)	0.33 ***	0.21	0.20 *	0.17	0.61 **	0.24	-0.41	-0.02	0.52	0.23	0.61 ***	0.40	0.40	0.28	1.52	0.08
Land tenure (Communal)	-0.68	-0.02	-0.12	-0.07	-0.37 *	-0.18	-0.82 *	-0.15	-0.17	-0.15	0.72 *	0.15	0.71 *	0.24	0.79	0.86
Land tenure (Private)	0.53 ***	0.52	0.12 *	0.13	0.31 ***	0.35	0.21 *	0.17	0.22	0.28	0.15	0.15	0.36 ***	0.57	0.22	0.15
Agricultural expansion	-0.29 ***	-0.27	-0.30 ***	-0.35	-0.97 *	-0.14	-0.20 ***	-0.41	-0.62	-0.15	0.15 *	0.19	0.07	0.01	0.23	0.82
Education level	0.22 ***	0.16	0.44 ***	0.35	0.21 ***	0.17	0.25 ***	0.27	0.12 ***	0.88	0.20 ***	1.40	0.39 *	0.32	0.36 ***	0.26
Road density	0.50 ***	0.43	0.42 ***	0.38	-0.23 **	-0.21	0.18 *	0.17	-0.07	-0.04	-0.94 ***	-0.87	-0.10 ***	-0.70	0.91	0.59

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.'1

Table 8. Standardized and unstandardized maximum likelihood coefficients of the Structural Equation Models linking predictor variables to food utilization (entitlement to public health care).

Exogenous Observed Variables	Mexico		Temperate Sierras		Tropical Dry Zone		Tropical Wet Zone		Great Plains		Southern Semi-Arid Highlands		North American Deserts		Mediterranean California	
	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs
Smallholder production index	0.12 ***	0.10	0.17 ***	0.12	0.11 ***	0.87	0.86 ***	0.76	-0.11	-0.16	0.20 ***	0.14	0.03	0.03	-0.30	-0.49
Subsistence index	-0.25 ***	-0.25	0.02	0.02	-0.94 ***	-0.96	0.07	0.07	0.01	0.01	0.12 *	0.13	0.05	0.07	0.07	0.12
Rainfed agriculture index	0.02	0.04	0.16 **	0.21	0.10 *	0.15	0.12 *	0.19	0.02	0.06	-0.07	-0.10	-0.33 ***	-0.67	0.11	0.30
Economic diversification index	0.70 ***	0.59	0.88 ***	0.76	0.58 ***	0.42	0.41 ***	0.30	0.13	0.24	0.77 ***	0.72	0.09	0.11	-0.04	-0.09
Land tenure (Ejidal)	-0.05	-0.01	-0.57	-0.04	0.72 **	0.23	-0.44 ***	-0.37	0.15	0.11	-0.23	-0.02	0.18 *	0.19	-0.10	-0.01
Land tenure (Communal)	0.44	0.01	0.59	0.03	-0.29	-0.03	0.21	0.02	-0.35 **	-0.48	0.40	0.09	-0.01	-0.01	0.27	0.06
Land tenure (Private)	0.16 ***	0.13	0.24 *	0.19	0.16 *	0.14	0.34 *	0.16	0.13	0.03	-0.16 *	-0.17	0.01	0.01	0.55	0.76
Education level	-0.71 ***	-0.46	-0.62 ***	-0.37	-0.74 ***	-0.48	-0.75 ***	-0.45	-0.49 ***	-0.63	-0.68 ***	-0.51	-0.47 ***	-0.54	-0.35 ***	-0.54
Road density	0.85 ***	0.62	0.46 ***	0.32	0.11	0.08	0.27 ***	0.15	-0.13	-0.13	0.07	0.06	2.72 *	0.26	0.07	0.09

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1

Table 9. Standardized and unstandardized maximum likelihood coefficients of the Structural Equation Models linking predictor variables to food utilization (undernutrition infrequency).

Exogenous Observed Variables	Mexico		Temperate Sierras		Tropical Dry Zone		Tropical Wet Zone		Great Plains		Southern Semi-Arid Highlands		North American Deserts		Mediterranean California	
	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs	Unstd. coeffs	Std. Coeffs
Smallholder production index	0.32 ***	0.50	0.46 ***	0.55	0.40 ***	0.43	0.40 ***	0.58	ND	ND	0.50 *	0.18	-0.10	-0.40	ND	ND
Subsistence index	0.00	0.01	-0.17 **	-0.21	0.10	0.30	0.10 **	0.21	ND	ND	-0.10	-0.10	0.40 *	0.30	ND	ND
Rainfed agriculture index	0.00	0.01	0.00	0.07	-0.10	-0.12	0.10 *	0.23	ND	ND	0.30 *	0.23	0.20	0.21	ND	ND
Economic diversification index	0.00	0.00	0.00	0.40	-0.30 **	-0.27	-0.10	-0.50	ND	ND	-0.20	-0.90	-0.10	-0.30	ND	ND
Agricultural expansion	-0.54 ***	-0.94	-0.33 ***	-0.61	-0.58 ***	-0.86	-0.57 ***	-0.13	ND	ND	-0.36 **	-0.24	-0.79 ***	-0.91	ND	ND
Crop diversity	0.33 ***	0.39	0.50 ***	0.49	0.70 ***	0.52	0.10	0.11	ND	ND	0.22 ***	0.79	0.18 ***	0.82	ND	ND
Education level	0.38 ***	0.45	0.20 *	0.21	0.50 ***	0.39	0.40 ***	0.48	ND	ND	0.17 ***	0.65	0.16 ***	0.84	ND	ND
Road density	0.00	0.01	0.17 *	0.02	0.10	0.12	-0.30 ***	-0.33	ND	ND	-0.30	-0.13	-0.53 *	-0.23	ND	ND

Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1

ND: No data

Conclusions

In this research, we propose a model for food security in Mexico based on food availability, food accessibility and food utilization. Using Structural Equations Modeling (SEM), the conceptual framework helped examine the relative influence of components of the agricultural system with respect to food security.

The structure of the agricultural system in Mexico

Our modeling provided a quantitative overview of the structure of the Mexican agricultural system. As is the case in most emerging economies [6], smallholder and subsistence agriculture are the most common types of agriculture. Private land tenure is prevalent in most production units although a significant proportion is under ownership (especially "ejidal" land tenure). However, in the context of a globalized economy (especially the relationship with the United States of America), a North-South divide is perceptible: only in ecoregions extending to the South is the rainfed agriculture practice prevalent. By contrast, a mixed (rainfed - irrigation) practice is prevalent in the mostly Northern ecoregions (the Great Plains, the Northern American Deserts and Mediterranean California). Medium size farms and a private land tenure are also prevalent in the Great Plains and Mediterranean California. In terms of food security aspects, a divide is notable between ecoregions that extend to the South and ecoregions confined to the North. For the latter, food access and food utilization tend to be higher (lower marginalization and higher entitlement to public health care, respectively). Likewise, food availability is also higher in the Northern ecoregions.

The proposed model for rural food security

National estimates of food security are traditionally based on health and nutrition surveys (food utilization) or on socio-economic poverty indices (food accessibility). In the case of Mexico, the former is implemented by the National Institute of Public Health and the latter by the National Commission for Statistical Assessments [90]. In 2016, 79.1% of the rural population was affected by some degree of food insecurity [91], and in 2018, 20.4% of the total population had insufficient income to acquire the basic food basket [90].

At the international level, the Global Food Security Index [92] incorporates the food availability aspect (production capacity and nutritional quality) and the Global Hunger Index is centered on food utilization. The hypothetical conceptual model we propose for food security in Mexico includes the three above mentioned aspects. An acceptable fit to the data was obtained for three recognized metrics, meaning our model is robust with respect to these aspects. Additionally, the direction of the generalized relationships between variables were consistent with the theoretical expectations of the conceptual model. Most variability of the rural food security was explained by food accessibility (the food access index) and by food utilization (entitlement to public health care).

Connections between the agricultural system and rural food security

Because the smallholder index was found with a significant positive relationship with all aspects of food security, our model indicates that the presence of smallholder agriculture systems relates to a higher food security in Mexico as documented by [93, 94, 45]. Within smallholder agriculture, ejidal (a collective agrarian structure) land tenure, crop diversity and economic diversification are attributes of a higher food security (positive and significant relationship in two of the food security

aspects). Crop diversity is an indicator of agrobiodiverse smallholder agriculture. In the Temperate Sierras (the most populated ecoregion), the smallholder agriculture paradigm which is beneficial to the concept of rural food security also includes rainfed agriculture, a strong component of the milpa traditional cultivation system. In contrast, the expansion of agricultural land is negatively related to food accessibility and food utilization, which suggests that the establishment of extensive commercial agriculture, used as a historical banner for the increase of food production, actually harms rural food security in Mexico.

However, strong attributes of commercial agriculture have been found beneficial to food security. The irrigation practice (low rainfed agriculture index value), market commercialization (low subsistence index value), and private land tenure significantly tend to foster food security in many cases. Considering all variables found with significant relationships, our results suggest that commercial agriculture is beneficial to food security especially if circumscribed to small parcels and producing a high diversity of crop. In this sense, the higher rural food security found in the Northern ecoregions of Mexico might not be due to larger parcels, but rather due to the stronger irrigation component of the agricultural system (mixed agricultural practice). Another form of agriculture, agroforestry, the combination of agriculture with the sustainable use of natural ecosystems, does not seem to influence food security at ecoregion and national levels (the forest cover variable is found not significant). Agroforestry has received much official publicity in the past two decades [95].

Limitations of the model with respect to the milpa traditional cultivation system

Because of the limitation of the data available in the agricultural census, our rural food security concept is necessarily limited. For example, subsistence agriculture and rainfed agriculture are two important attributes of the milpa traditional cultivation system. Both attributes have been found to be significantly negatively correlated with food accessibility. This negative relationship primarily reflects correlations between low cost agricultural practices (subsistence and rainfed agriculture) and the lack of monetary income (marginalization index, our proxy for food accessibility). However, beyond the monetary access to food, the food accessibility concept embraces agrobiodiversity, which has characterized the traditional milpa cultivation system [43, 46], and community exchanges of products.

Both rainfed agriculture index and subsistence index have also been found significantly and negatively related to the availability aspect of food security, while crop diversity has been found significantly and positively related to food availability. This result suggests that most subsistence farmers may have abandoned the milpa traditional cultivation system and opted for monoculture (principally maize), possibly because of the migration of family members, an important labour force required for the milpa system [42]. In any case, variables such as land tenure, presence of forest cover and farm size (used in this study), which contain a resource governance connotation, may not be sufficient to reflect the agroecological practice in the country [47]. Additional variables such as the use of native, hybrid or transgenic seeds, the type of social organization, and eco-systemic services, should complement the food accessibility concept, especially in view of the food sovereignty goals promoted by the current Mexican government.

Perspectives of this study for Mexico and the emerging economies

The contribution of emerging countries with high agricultural capacity to global food security is well documented (Ali, 2018). In particular, the quantitative availability of food has been boosted by an increase in the industrialization of agriculture in strategic regions of those countries [96], sometimes with foreign investment [97]. However, this situation has also been reported as environmentally unsustainable for the affected regions [47] and has caused numerous social-environmental conflicts explained in the frame of globalization and telecoupling of socio-ecological systems [98]. In view of the above, it is fundamental to characterize the role of smallholder agriculture and strengthen food security for the rural population of the emerging countries.

The method employed in this study could help identify and geographically differentiate influences of the agricultural system on food security in emerging countries. It is built upon the available data from an agricultural national census, and can adapt any spatial unit, geographic disaggregation and data type. This research should contribute to assess and orient public policies towards the Sustainable Development Goals (SDG) 2030 suggested by the United Nations. SDG targets 2.1 and 2.2 are "ensuring access to safe, nutritious and sufficient food for all, and eliminating all forms of malnutrition", respectively. In the future, a space-time dynamic could be explored using Spatio-Temporal Structural Equation Modeling [99] and dynamics system approach [100], incorporating the forecoming agricultural census. The addition of agroecological variables (to be incorporated in future INEGI censuses) in the model is perceived as fundamental in view of avoiding biases of interpretation and for the sustainability of food production in Mexico.

References

1. United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. General Assembly 70 session.
2. FAO. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050, en *Cómo alimentar al mundo en 2050*, Secretaría del Foro de Alto Nivel de Expertos, Italia, Roma. 2009; pp. 4.
3. Clay, E. Food Security: Concepts and Measurement, Paper for FAO Expert Consultation on Trade and Food Security: Conceptualising the Linkages Rome, 11-12 July 2002. Chapter 2 of Trade Reforms and Food Security: conceptualising the linkages. Rome: FAO. 2002.
4. Denny, R. C., Marquart-Pyatt, S. T., Ligmann-Zielinska, A., Olabisi, L. S., Rivers, L., Du, J., & Liverpool-Tasie, L. S. O. Food security in Africa: a cross-scale, empirical investigation using structural equation modeling. *Environment Systems and Decisions*. 2018; 38(1), 6-22.
5. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2019. Safeguarding against economic slowdowns and downturns. Rome, FAO. 2019.
6. Nicholson C.F., Stephens E.C., Jones A.D., Kopainsky B., Parsons D. and Garrett J. Setting priorities to address the research gaps between agricultural systems analysis and food security outcomes in low- and middle-income countries. CCAFS Working Paper no. 255. Wageningen, the Netherlands: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). 2019. Available online at: www.ccafs.cgiar.org.
7. Herrero, M., Thornton, P. K., Power, B., Bogard, J. R., Remans, R., Fritz, S. & Watson, R. A. Farming and the geography of nutrient production for human use: a transdisciplinary analysis. *Lancet Planet. Health*. 2017; 1(1), e33-e42.
8. Pinstrup-Andersen, P. Agricultural research and policy for better health and nutrition in developing countries: a food systems approach. *Agric Econ*. 2007; 37, 187-198.

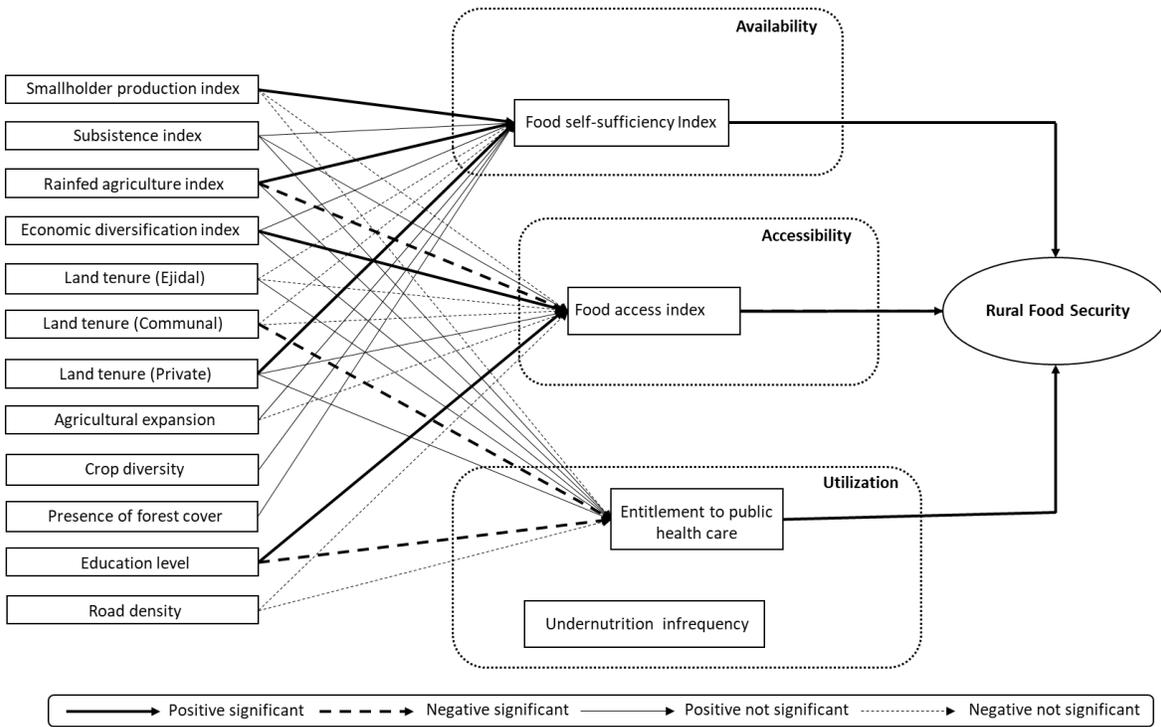
9. Ritchie, H. & Roser, M. "Crop Yields". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/crop-yields' [Online Resource] Accessed Feb 12 2020.
10. Bai, X., Chen, J., & Shi, P. Landscape urbanization and economic growth in China: Positive feedbacks and sustainability dilemmas. *Environ. Sci. Technol.* 2011; 46, 132–139.
11. Hatab, A. A., Cavinato, M. E. R., Lindemer, A., & Lagerkvist, C. J. Urban sprawl, food security and agricultural systems in developing countries: A systematic review of the literature. *Cities.* 2019; 94, 129–142.
12. Li, S. Change detection: How has urban expansion in Buenos Aires metropolitan region affected croplands. *Multivariate Behav Res.* 2017; 11, 195–211.
13. Dewan, A. M., & Yamaguchi, Y. Land use and land cover change in greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Appl Geogr.* 2009; 29, 390–401.
14. García-Barríos, L., Galván-Miyoshi, Y. M., Valsieso-Pérez, I. A., Masera, O. R., Bocco, G., & Vandermeer, J. Neotropical forest conservation, agricultural intensification, and rural out-migration: the Mexican experience. *BioScience.* 2009; 59(10), 863-873.
15. Galeana-Pizaña, J. M., Couturier, S., & Monsivais-Huertero, A. Assessing food security and environmental protection in Mexico with a GIS-based Food Environmental Efficiency index. *Land Use Policy.* 2018; 76, 442-454.
16. Thornton, P. K. Livestock production: Recent trends, future prospects. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences.* 2010; 365, 2853–2867.
17. Gómez Oliver, Luis. *Agricultura familiar: política de desarrollo con enfoque territorial.* México. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Economía. Primera edición. 2017. 197 p.
18. Luiselli, C. *Agricultura y alimentación en México: evolución, desempeño y perspectivas.* Siglo Veintiuno. 2017.
19. Clapp, J. *Food security and international trade: Unpacking disputed narratives.* Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2015.
20. Kose, M. A., Meredith, G. M., & Towe, C. M. How has NAFTA affected the Mexican economy? Review and evidence. In *Monetary Policy and Macroeconomic Stabilization in Latin America.* Springer, Berlin, Heidelberg. 2005; pp. 35-81.
21. Palma, J. G. The seven main “stylized facts” of the Mexican economy since trade liberalization and NAFTA. *Ind Corp Change.* 2005; 14(6), 941-991.
22. Galvan-Miyoshi, Y., Walker, R., & Warf, B. Land change regimes and the evolution of the maize-cattle complex in neoliberal Mexico. *Land.* 2015; 4(3), 754-777.
23. Reynoso, L. H., Salazar, R. L., & Esquer, M. D. R. P. El Programa de Apoyo Alimentario y la política social integral en la Cruzada contra el Hambre en México. *Revista mexicana de ciencias políticas y sociales.* 2016; 61(227), 379-407.
24. Dyer, G. A., & Taylor, J. E. The corn price surge: impacts on rural Mexico. *World Dev.* 2011; 39(10), 1878-1887.
25. *Diario de la Federación. Seguridad Alimentaria Mexicana.* Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, México. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5548402&fecha=18/01/2019. Accessed 15 Agos2019.
26. Prosekov A.Y. & Ivanova, S.A. Food security: The challenge of the present. *Geoforum.* 2018; 91, 73-77.
27. Sassi, M. The history of food security: approaches and policies. In *Understanding Food Insecurity.* 2018; 89-120.
28. Shamah-Levy, T., Mundo-Rosas, V., & Rivera-Dommarco, J. A. La magnitud de la inseguridad alimentaria en México: su relación con el estado de nutrición y con factores socioeconómicos. *Salud Pública de México.* 2014; 56, s79-85.
29. Instituto Nacional de Salud Pública. Encuesta Nacional de Salud y Nutrición. ENSANUT 2012. Resultados Nacionales. Cuernavaca: Instituto Nacional de Salud Pública- Secretaría de Salud. 2012.

30. Romo-Avilés, M., & Ortiz-Hernández, L. Energy and nutrient supply according to food insecurity severity among Mexican households. *Food Secur.* 2018; 10(5), 1163-1172.
31. Vilar-Compte, M., Gaitán-Rossi, P. & Pérez-Escamilla, R. Food insecurity measurement among older adults: Implications for policy and food security governance. *Glob. Food Sec.* 2017; 14, 87-95.
32. Cuevas-Nasu, L., Rivera-Dommarco, J. A., Shamah-Levy, T., Mundo-Rosas, V., & Méndez-Gómez Humarán, I. Inseguridad alimentaria y estado de nutrición en menores de cinco años de edad en México. *salud pública de México.* 2014; 56, s47-s53.
33. Urquía-Fernández, N. La seguridad alimentaria en México. *Salud pública de México.* 2014; 56, s92-s98.
34. Mundo-Rosas, V., Shamah-Levy, T., & Rivera-Dommarco, J. A. Epidemiología de la inseguridad alimentaria en México. *salud pública de México.* 2013; 55, S206-S213.
35. Magaña-Lemus, D., Ishdorj, A., Rosson, C. P., & Lara-Álvarez, J. Determinants of household food insecurity in Mexico. *Agric. Food Econ.* 2016; 4(1), 10.
36. Ibarrola-Rivas, M. J., & Galicia, L. Rethinking food security in Mexico: discussing the need for sustainable transversal policies linking food production and food consumption. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía.* 2017; (94), 106-121.
37. Shamah-Levy, T., Mundo-Rosas, V., Flores-De la Vega, M. M., & Luiselli-Fernández, C. Food security governance in Mexico: How can it be improved?. *Glob. Food Sec.* 2017; 14, 73-78.
38. García-Salazar, J. A., Skaggs, R., & Crawford, T. L. PROCAMPO, the Mexican corn market, and Mexican food security. *Food Secur.* 2011; 3(3), 383.
39. Calancie, L., Allen, N. E., Ng, S. W., Weiner, B. J., Ward, D. S., Ware, W. B., & Ammerman, A. S. Evaluating food policy councils using structural equation modeling. *Am J Community Psychol.* 2018; 61(1-2), 251-264.
40. FAO. América Latina y el Caribe: panorama de la seguridad alimentaria y nutricional. *Sistemas alimentarios sostenibles para poner fin al hambre y la malnutrición.* 2017.
41. Spedding, C. An introduction to agricultural systems. Springer Science & Business Media. 2012.
42. Bermeo, A., Couturier, S., & Pizaña, M. G. Conservation of traditional smallholder cultivation systems in indigenous territories: Mapping land availability for milpa cultivation in the Huasteca Poblana, Mexico. *Appl Geogr.* 2014; 53, 299-310.
43. Sibhatu, K. T., & Qaim, M. Rural food security, subsistence agriculture, and seasonality. *PLoS one.* 2017; 12(10), e0186406.
44. Pelletier, B., Hickey, G. M., Bothi, K. L., & Mude, A. Linking rural livelihood resilience and food security: an international challenge. *Food Secur.* 2016; 8(3), 469-476.
45. Lerner, A. M., Eakin, H., & Sweeney, S. Understanding peri-urban maize production through an examination of household livelihoods in the Toluca Metropolitan Area, Mexico. *J Rural Stud.* 2013; 30, 52-63.
46. Altieri, M. A., Funes-Monzote, F. R., & Petersen, P. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agron Sustain Dev.* 2012; 32(1), 1-13.
47. Koohafkan, P., Altieri, M. A., & Gimenez, E. H. Green agriculture: foundations for biodiverse, resilient and productive agricultural systems. *Int J Agric Sustain.* 2012; 10(1), 61-75.
48. Soto Mora, C. La agricultura comercial de los distritos de riego en México y su impacto en el desarrollo agrícola. *Investigaciones geográficas.* 2003; (50), 173-195.
49. Ávila-Foucat, V. S., & Rodríguez-Robayo, K. J. Determinants of livelihood diversification: The case of wildlife tourism in four coastal communities in Oaxaca, Mexico. *Tour Manag.* 2018; 69, 223-231.
50. Jarquín Sánchez, N. H., Castellanos Suárez, J. A., & Sangerman-Jarquín, D. M. Pluriactividad y agricultura familiar: retos del desarrollo rural en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas.* 2017; 8(4), 949-963.
51. Bommarco, R., Vico, G., & Hallin, S. Exploiting ecosystem services in agriculture for increased food security. *Glob. Food Sec.* 2018; 17, 57-63.

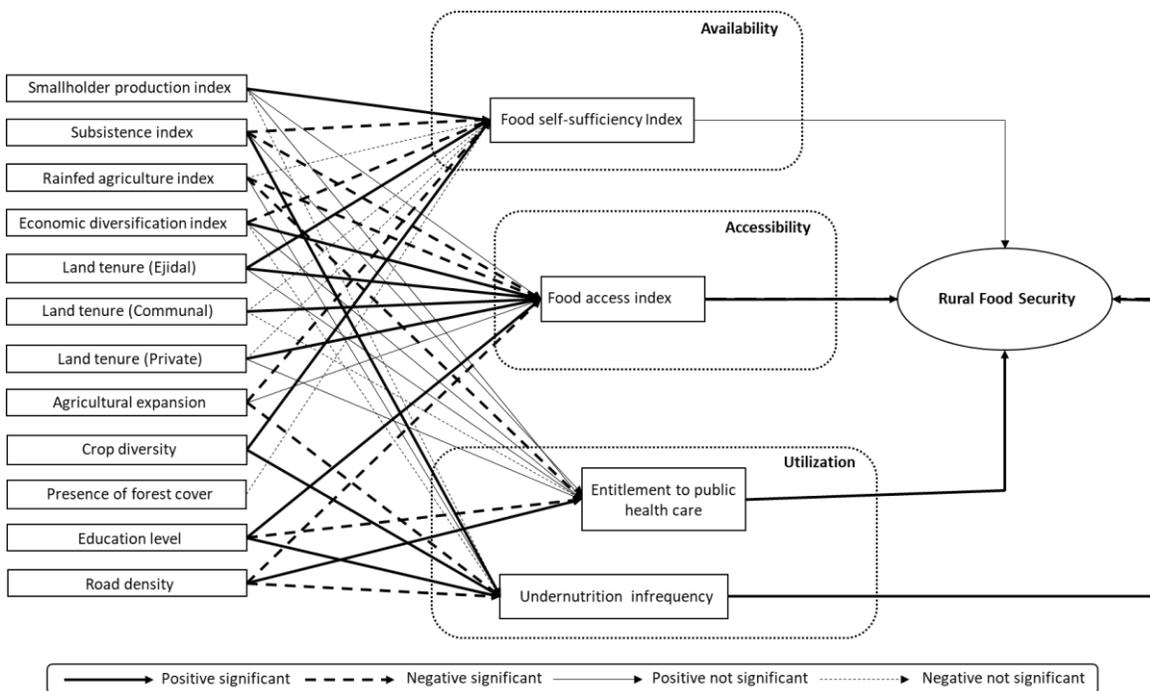
52. Garibaldi, L. A., Andersson, G. K., Requier, F., Fijen, T. P., Hipólito, J., Kleijn, D. & Rollin, O. Complementarity and synergisms among ecosystem services supporting crop yield. *Glob. Food Sec.* 2018; 17, 38-47.
53. Zabala, A. Land and food security. *Nat. Sustain.* 2018; 1(7), 335
54. Meyfroidt, P. Trade-offs between environment and livelihoods: Bridging the global land use and food security discussions. *Glob. Food Sec.* 2018; 16, 9-16.
55. CONEVAL. Metodología para la medición multidimensional de la pobreza en México. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. 2009.
56. Félix-Verduzco, G., Aboites Manrique, G., & Castro Lugo, D. La seguridad alimentaria y su relación con la suficiencia e incertidumbre del ingreso: un análisis de las percepciones del hogar. *Acta universitaria.* 2018; 28(4), 74-86.
57. Frayne, B., McCordic, C., Planning for food secure cities: measuring the influence of infrastructure and income on household food security in Southern African cities. *Geoforum.* 2015; 65, 1–11.
58. Santos, F., Fletschner, D., Savath, V., Peterman, A., Can government-allocated land contribute to food security?: Intrahousehold analysis of West Bengal’s Microplot Allocation Program. *World Dev.* 2014; 64, 860–872.
59. Kline, R. B. Principles and practice of structural equation modeling. Guilford publications. 2015.
60. CONAPO. Consejo Nacional de Población, Índice de marginación por localidad 2010, Colección: Índices Sociodemográficos. Consejo Nacional de Población, México D.F. 2012. pp. 2012.
61. Hair Jr, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C., & Sarstedt, M. A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). Sage publications. 2016.
62. Park, E. Social acceptance of green electricity: Evidence from the structural equation modeling method. *J. Clean. Prod.* 2019; 215, 796-805.
63. Scherer, R., Tondeur, J., Siddiq, F., & Baran, E. The importance of attitudes toward technology for pre-service teachers' technological, pedagogical, and content knowledge: Comparing structural equation modeling approaches. *Comput. Hum. Behav.* 2018; 80, 67-80.
64. Kansky, R., Kidd, M., & Knight, A. T. A wildlife tolerance model and case study for understanding human wildlife conflicts. *Biol. Conserv.* 2016; 201, 137-145.
65. Schivinski, B., & Dabrowski, D. The impact of brand communication on brand equity through Facebook. *J. Res. Interact. Mark.* 2015; 9(1), 31-53.
66. Ding, C., Wang, Y., Tang, T., Mishra, S., & Liu, C. Joint analysis of the spatial impacts of built environment on car ownership and travel mode choice. *Transp Res D Transp Environ.* 2018 ; 60, 28-40.
67. Crouch, N. M., & Mason-Gamer, R. J. Structural equation modeling as a tool to investigate correlates of extra-pair paternity in birds. *PloS one.* 2018; 13(2), e0193365.
68. King, C. Food insecurity and housing instability in vulnerable families. *Rev Econ Househ.* 2018; 16(2), 255-273.
69. Raykov, T., & Marcoulides, G. A. A first course in structural equation modeling. Routledge. 2012.
70. Instituto Nacional de Estadística y Geografía(a) (INEGI). Censo agropecuario y ejidal. México. <https://www.inegi.org.mx/programas/cagf/2007/>. Accessed Feb 14 2019.
71. INEGI. Carta de Uso de Suelo y Vegetación, Serie IV, Continuo Nacional. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. 2007.
72. INEGI. Carta de Uso de Suelo y Vegetación, Serie VI, Continuo Nacional. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. 2017.
73. INEGI. Red Nacional de caminos. Nacional. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. 2017.
74. INEGI. Censo de población y vivienda. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. 2010.
75. Samberg, L. H., Gerber, J. S., Ramankutty, N., Herrero, M., & West, P. C. Subnational distribution of average farm size and smallholder contributions to global food production. *Environ. Res. Lett.* 2016; 11(12), 124010.
76. FAO-SAGARPA. Agricultura familiar con potencial productivo en México. FAO. 2012.

77. Schneider, S. La agricultura familiar en América Latina. Un nuevo análisis comparativo. FIDA/RIMISP. 2014.
78. Diario de la Federación. Ley de Desarrollo Rural Sustentable. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, México. 2012.
79. García-Urigüen, P. La alimentación de los mexicanos. Cambios Sociales y Económicos, y su Impacto en los Hábitos Alimenticios. Cámara Nacional de la Industria de la Transformación (CANACINTRA) DF, México. 2012.
80. Cuéllar, J.A. Programa de seguridad alimentaria: experiencias en México y otros países. 2011.
81. Peralta, M.A.Q., Cobos, R.M.G., Delgado, F.C. Implicaciones de la disminución de la capacidad productiva de granos básicos sobre la alimentación en comunidades rurales pobres de México. *Economía agraria y recursos naturales*. 2016; 16 (2), 33–67.
82. Pedraza, D. F. Seguridad alimentaria y nutricional. Determinantes y vías para su mejora. *Revista Salud Pública y Nutrición*. 2005; 6(1).
83. Rosseel, Y. Lavaan: An R package for structural equation modeling and more. Version 0.5–12. *J. Stat. Softw.* 2012; 48(2), 1-36.
84. Lai, K., & Green, S. B. The problem with having two watches: Assessment of fit when RMSEA and CFI disagree. *MBR*. 2016; 51(2-3), 220-239.
85. MacCallum, R. C., Browne, M. W., & Sugawara, H. M. Power analysis and determination of sample size for covariance structure modeling. *Psychol Methods*. 1996; 1, 130–149.
86. McDonald, R. P., & Ho, M.-H. R. Principles and practice in reporting structural equation analyses. *Psychol Methods*. 2002; 7, 64–82. doi: 10.1037/1082-989X.7.1.64
87. Hu, L., & Bentler, P. M. Cutoff criteria in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Struct Equ Modeling*. 1999; 6, 1–55.
88. HLPE. Investing in smallholder agriculture for food security. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome. 2013.
89. Ávila-Burgos, L., Serván-Mori, E., Wirtz, V. J., Sosa-Rubí, S. G., & Salinas-Rodríguez, A. Efectos del Seguro Popular sobre el gasto en salud en hogares mexicanos a diez años de su implementación. *Salud Pública de México*. 2013; 55, S91-S99.
90. CONEVAL. Medición de la Pobreza. <https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza-2018.aspx>. Accessed 1 Agos 2019.
91. Mundo-Rosas, V., Vizuet-Vega, N. I., Martínez-Domínguez, J., Morales-Ruán, M., Pérez-Escamilla, R., & Shamah-Levy, T. Evolución de la inseguridad alimentaria en los hogares mexicanos: 2012-2016. *salud pública de México*. 2018; 60, 309-318.
92. The Economist Intelligence Unit. Global Food Security Index. [http:// foodsecurityindex.eiu.com/Index](http://foodsecurityindex.eiu.com/Index) Accessed Agos 11 2019.
93. Eakin, H., Appendini, K., Sweeney, S., & Perales, H. Correlates of maize land and livelihood change among maize farming households in Mexico. *World Dev*. 2015; 70, 78-91.
94. Eakin, H., Perales, H., Appendini, K., & Sweeney, S. Selling maize in Mexico: the persistence of peasant farming in an era of global markets. *Dev Change*. 2014 ; 45(1), 133-155.
95. CONAFOR. <https://www.gob.mx/conafor> (2019). Accessed 3 Ene 2020.
96. Henneberry, S. R., & Díaz Carrasco, C. P. Global food security: Emerging economies and diverging food markets. *Journal of Food Distribution Research*. 2014; 45(856-2016-58131), 29-34.
97. Swinnen, J., & Kuijpers, R. Value chain innovations for technology transfer in developing and emerging economies: Conceptual issues, typology, and policy implications. *Food Policy*. 2019; 83, 298-309.
98. Bruckner, M., Fischer, G., Tramberend, S., & Giljum, S. Measuring telecouplings in the global land system: A review and comparative evaluation of land footprint accounting methods. *Ecol Econ*. 2015; 114, 11-21.
99. Damgaard, C. Spatio-Temporal Structural Equation Modeling in a Hierarchical Bayesian Framework: What Controls Wet Heathland Vegetation?. *Ecosystems*. 2019; 22(1), 152-164.
100. Serman, J. Business dynamics. Irwin/McGraw-Hill 2000. 2010.

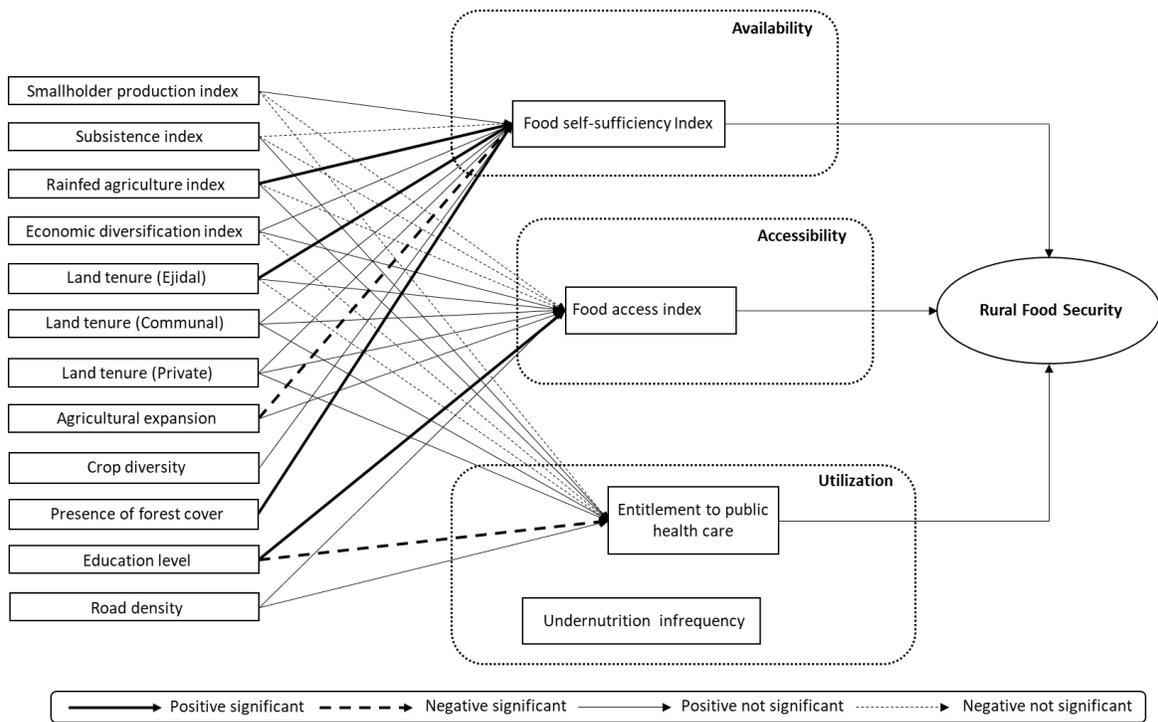
Supplementary material



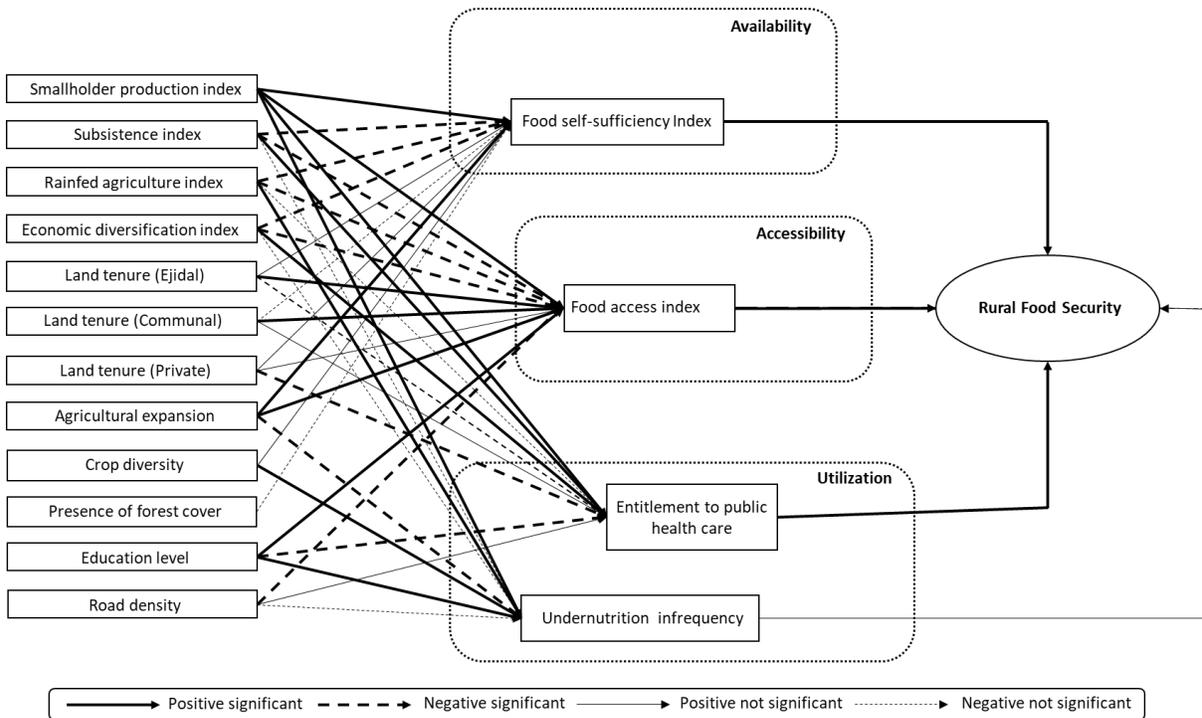
Path diagram showing simplified model results for Great Plains model



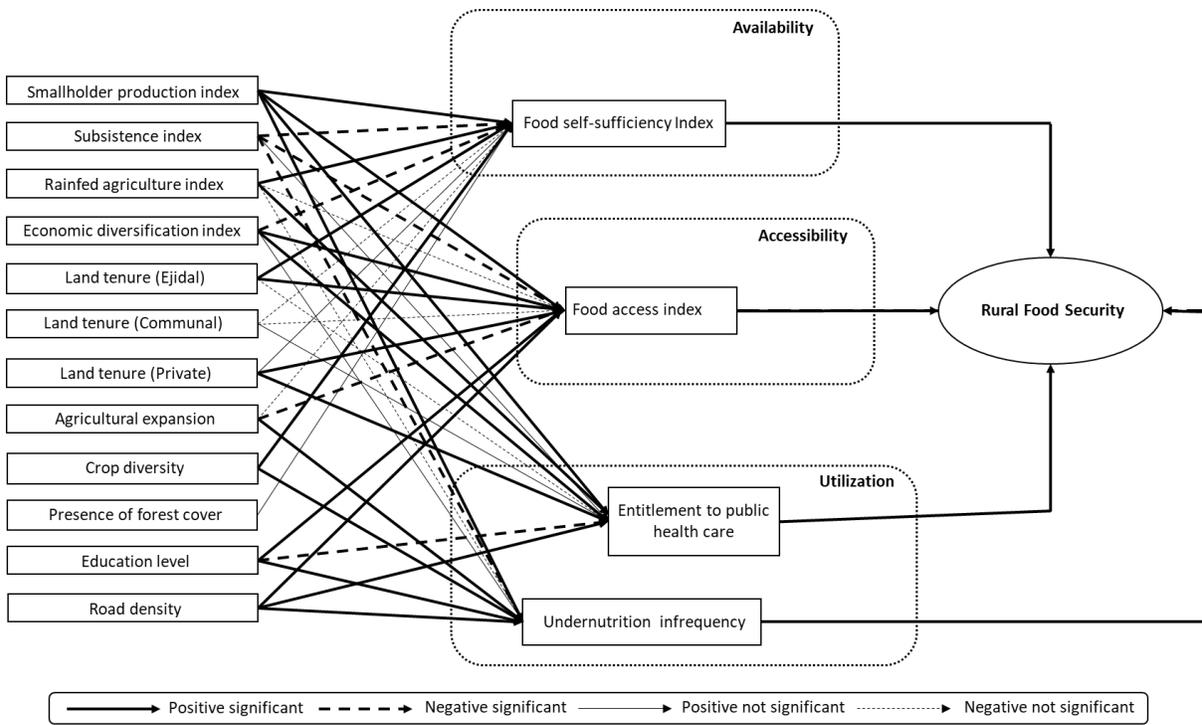
Path diagram showing simplified model results for North American Deserts model



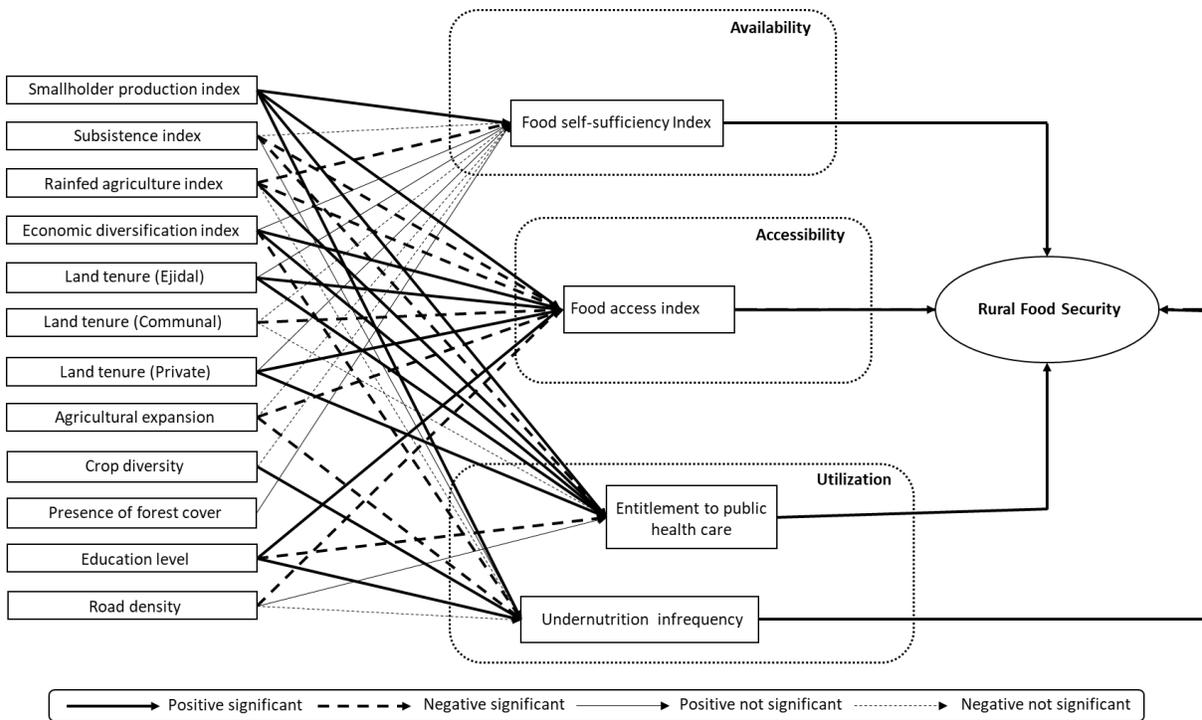
Path diagram showing simplified model results for Mediterranean California model



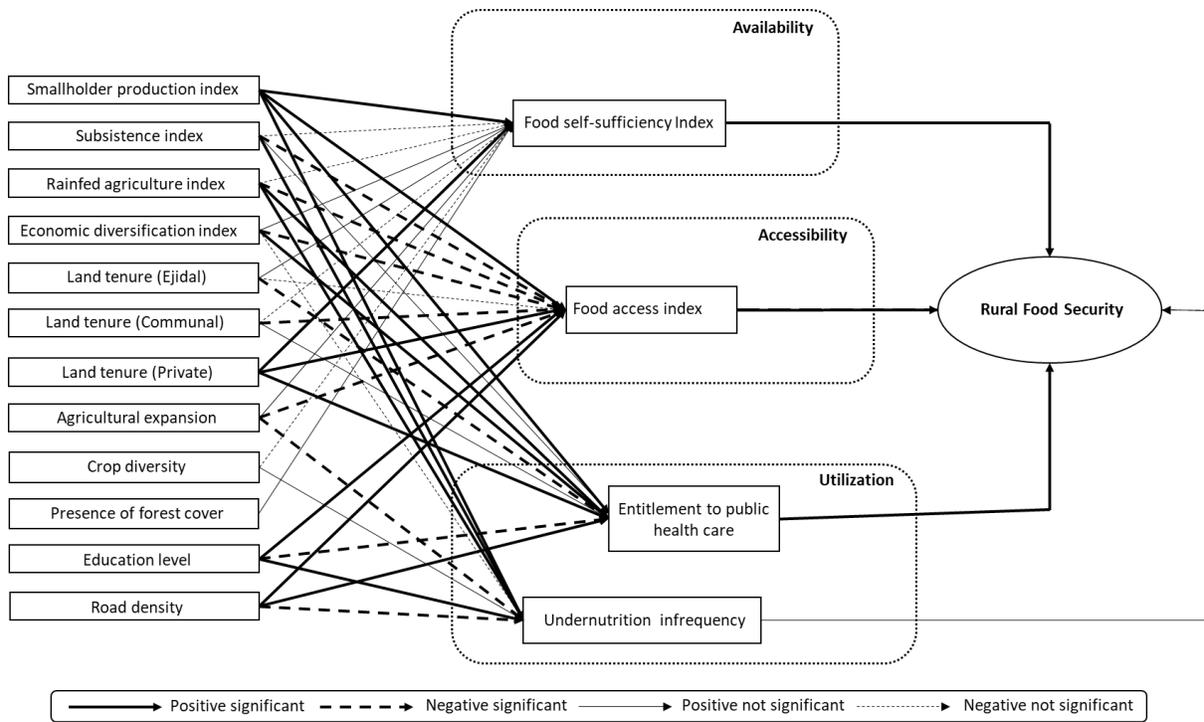
Path diagram showing simplified model results for Southern Semi-Arid Highlands model



Path diagram showing simplified model results for Temperate Sierras model



Path diagram showing simplified model results for Tropical Dry Zone model



Path diagram showing simplified model results for Tropical Wet Zone model.

Capítulo 6

Conclusiones y Perspectivas

6.1 Conclusiones generales

El reto de la seguridad alimentaria ha adquirido mayor relevancia en los programas mundiales debido a la creciente demanda de alimentos y a la persistencia del hambre y la desnutrición. Debido a esas necesidades y a la complejidad de abordar la seguridad alimentaria, hay un interés considerable en identificar los principales factores determinantes, especialmente en el caso de las economías emergentes con sistemas agrícolas asimétricos en los que intervienen la agricultura industrial y la agricultura en pequeña escala, como es el caso de México. En ese sentido, los objetivos que fueron trazados al inicio de la investigación se llevaron a cabo y arrojaron los siguientes resultados destacados:

Ojetivo 1: Formular un índice de eficiencia alimentaria - ambiental a partir de la relación emergente entre el cambio de uso de la tierra y tendencias de seguridad alimentaria (acceso a los alimentos y autosuficiencia alimentaria) en las distintas ecorregiones de México.

- El análisis del CUS en México para un período de 35 años (1976–2011), mostró una expansión continua de tierras de cultivo y tierras de pastoreo a expensas de los ecosistemas naturales en todo el país. Más allá de la conversión en tierras de cultivo y tierras de pastoreo, una parte sustancial del territorio del país se convirtió en vegetación secundaria como resultado de los cambios pasados en el uso de la tierra, generando con ello posibles impactos negativos sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos importantes de mantener para garantizar el bienestar humano y que es usualmente ignorado en los informes oficiales a nivel nacional y global (por ejemplo, los de la FAO). A pesar de la expansión agropecuaria, el análisis de tendencias de seguridad alimentaria a nivel nacional reveló que existe un estancamiento del acceso a los alimentos en todo el país (condición baja respecto al promedio) que tiende a disminuir la autosuficiencia alimentaria.
- El índice de Eficiencia Alimentaria-Ambiental (FEE) encontró asociación entre las grandes expansiones de tierras de cultivo de la zona Tropical Húmeda y en los Desiertos de América del Norte con niveles bajos de seguridad alimentaria (valores de FEE fuertemente negativos). Este resultado invita a repensar la lógica detrás de la promoción de la expansión extensiva de las

tierras de cultivo a través de incentivos (Fischer et al., 2014), y a cambio diseñar paisajes capaces de conservar los recursos naturales y garantizar a través de estos la seguridad alimentaria. El FEE también mostró, que la creencia generalizada de que a nivel nacional la seguridad alimentaria podría haber mejorado desde 2002 por la mejora de la autosuficiencia de la carne de bovino no es cierta. De hecho, la expansión de las tierras de pastoreo se correlacionó con la disminución de la seguridad alimentaria para todas las zonas excepto dos ecorregiones de las siete del país (Elevaciones semiáridas del sur y Sierras templadas); al mismo tiempo que la expansión de las tierras de cultivo se correlacionó con el aumento de la seguridad alimentaria únicamente para tres ecorregiones (Elevaciones semiáridas del sur, Sierras templadas y Grandes Planicies). Es decir, la expansión de tierras de cultivos está levemente más asociada con la seguridad alimentaria en México que la expansión de tierras para actividades ganaderas.

- Tanto a nivel de ecorregión como a nivel nacional se observó una tendencia a la baja del acceso a los alimentos y autosuficiencia alimentaria negativa para la mayoría de los cultivos y el ganado dentro de cada ecorregión. No obstante, en el caso del maíz la idea de que la expansión de las tierras de cultivo en todo el país podría haber desencadenado una mejora generalizada en la autosuficiencia de este grano a nivel nacional, se diluye cuando se detalla a nivel de ecorregión: el 51% de la expansión acumulada de tierras de cultivo se produjo en la ecorregión Tropical Húmeda y en las Sierras Templadas, mismas que concentran la mayor cantidad de población mexicana y en donde la autosuficiencia del maíz no ha mejorado y sigue siendo negativa. A pesar de esto, es importante reconocer que la autosuficiencia del maíz ha mejorado en las ecorregiones restantes, en donde la expansión de las tierras de cultivo fue mucho menor, y en conjunto con otros factores impulsaron la mejora de la autosuficiencia del maíz reflejada en el análisis a nivel nacional.

Objetivo 2: Proponer un modelo de análisis para la seguridad alimentaria rural en México incorporando aspectos de disponibilidad, accesibilidad y utilización de los alimentos.

- El modelo conceptual propuesto obtuvo un ajuste aceptable a los datos para tres métricas reconocidas, lo que respaldó con suficiente robustez el análisis y la correspondiente interpretación de los resultados. La dirección de las relaciones probadas entre las variables fue consistente con las expectativas teóricas del modelo conceptual. La mayor parte de la variabilidad de la seguridad alimentaria rural se explicó por la accesibilidad a los alimentos (el índice de acceso a los alimentos) y por la utilización de los alimentos (derecho a la atención sanitaria pública).
- Las variables que componen al sistema agrícola y de contexto territorial que dan forma a los pilares de seguridad alimentaria que fueron incorporados en el modelo de ecuaciones estructurales son: tamaño de la unidad de producción a través del índice de pequeños productores, destino de la producción mediante el índice de subsistencia, origen de los ingresos a través del índice de diversidad económica, diversidad de cultivos, tipo de agricultura a través del índice de temporal, tenencia de la tierra, accesibilidad de infraestructura vial, además de otras variables de contexto territorial (e.g. índice de acceso a los alimentos, nivel escolaridad).

Objetivo 3: Identificar los factores de los sistemas agrícolas que potencian y dificultan la seguridad alimentaria rural del país que aporten conocimiento útil para la toma de decisiones en torno a políticas agrícolas en México.

- Tras el análisis de los modelos de ecuaciones estructurales, las principales variables que mostraron asociación significativa con la seguridad alimentaria rural fueron: el índice de pequeños productores, el grado de escolaridad, la densidad de caminos, el índice de subsistencia y la diversidad de cultivos presentes en la zona. El índice de pequeños agricultores tuvo una relación significativa y positiva con todos los aspectos de la seguridad alimentaria, es decir, nuestro modelo mostró que la presencia de sistemas agrícolas de pequeños agricultores se relaciona con una mayor seguridad alimentaria en México. Dentro de la agricultura en pequeña escala, la tenencia de la tierra ejidal (una estructura agraria de mancomunidad), la diversidad de cultivos y la diversificación económica son atributos de una mayor seguridad alimentaria (relación positiva y significativa en dos de los tres aspectos de la seguridad alimentaria) (Varón, 2011; Greene et al., 2017; Shelembi, 2020). La expansión de las tierras agrícolas también estuvo relacionada negativamente con la accesibilidad y la utilización de los alimentos, resultado que sugiere que el establecimiento de sistemas agrícolas comerciales extensivos usados históricamente como bandera de gobierno para aumentar la producción de alimentos, en realidad perjudica la seguridad alimentaria rural en México.
- Algunos atributos que caracterizan la agricultura comercial (práctica de riego, comercialización en el mercado y tenencia privada de la tierra) impulsan la seguridad alimentaria en ciertas ecorregiones, especialmente las del norte del país. Esto último debe contextualizarse al largo plazo, ya que en México no existe un manejo del agua para riego y muchas políticas asistencialistas promueven la sobre-explotación de los recursos naturales para cubrir las demandas crecientes de exportación de productos con altos requerimientos de agua para su producción, transformación y comercialización en mercados internacionales (Gálvez, 2018). La contribución de los países emergentes con gran capacidad agrícola para aportar a la seguridad alimentaria mundial está bien documentada (Ali, 2018). En particular, la disponibilidad de alimentos se ha visto impulsada por un aumento de la industrialización de la agricultura en regiones estratégicas de países en desarrollo (Henneberry & Díaz Carrasco, 2014), a veces con inversiones extranjeras (Swinnen & Kuijpers, 2019). Sin embargo, también se reconoce que esto es ambientalmente insostenible para las regiones afectadas (Koohafkan et al., 2012) y ha causado numerosos conflictos socioambientales que se explican en el marco de la globalización y la teleconexión de los sistemas socioecológicos (Bruckner et al., 2015).
- En el país se percibe una división Norte-Sur: sólo en las ecorregiones que se extienden hacia el Sur prevalece la práctica de la agricultura de temporal. En cambio, las prácticas mixtas (temporal y de riego) son predominante en las ecorregiones del Norte (las Grandes Llanuras, los Desiertos de América del Norte y la California mediterránea). Existe un problema de accesibilidad ampliamente distribuido como resultado de las brechas socioeconómicas, las asimetrías en la distribución de alimentos y la expansión agropecuaria especialmente en zonas rurales del sur y sureste de México, que continúan siendo promovida bajo la idea de aumentar la producción,

sin poner la debida atención sobre los conflictos reales de distribución y acceso a los alimentos en las zonas rurales (Fischer et al., 2014).

- La agrosilvicultura, una práctica que combina la agricultura con el uso sostenible de los ecosistemas naturales (bosques y selvas), no parece tener una influencia directa sobre la seguridad alimentaria a nivel de ecorregión ni a nivel nacional pues en nuestros modelos la variable de cubierta forestal no tuvo influencia significativa sobre los tres pilares de seguridad alimentaria evaluados. Aunque la agrosilvicultura ha recibido mucha publicidad oficial en los dos últimos decenios (CONAFOR, 2019) y quizá no haya tenido grandes efectos para la alimentación del México rural, no pretendemos descreditar con nuestro resultado los beneficios atribuidos a este tipo de producción en terminos ecológicos ni socioculturales. Sin embargo, insistimos en la necesidad de estudios posteriores que evalúen explícitamente tipos de agricultura alternativa a la luz del potencial teórico que tienen para sostener la seguridad alimentaria (Shelembi, 2020).

Hipótesis 1. El índice de eficiencia alimentaria mostrará que el cambio de uso del suelo (expansión agrícola) no tiene un impacto positivo en la seguridad alimentaria en las ecorregiones de México.

- **Se aceptó la hipótesis:** el índice de eficiencia alimentaria mostró que el cambio de uso del suelo (expansión agrícola) no tuvo un impacto positivo en la seguridad alimentaria en las ecorregiones de México.

Hipótesis 2. Los factores típicos de los sistemas agrícolas de subsistencia estarán mayormente asociados al mantenimiento de la seguridad alimentaria rural en comparación con factores que caracterizan a la agricultura comercial.

- **Se rechazó la hipótesis:** los factores típicos de los sistemas agrícolas de subsistencia (la agricultura en pequeña escala, la tenencia de la tierra ejidal, la diversidad de cultivos y la diversificación económica), estuvieron mayormente asociados al mantenimiento de la seguridad alimentaria rural únicamente para las ecorregiones del centro y sur - sureste del país. Las ecorregiones del norte de México mostraron mayor asociación de la seguridad alimentaria rural con atributos que caracterizan la agricultura comercial (práctica de riego, comercialización en el mercado y tenencia privada de la tierra).

6.2 Principales contribuciones

- El índice FEE propuesto en este trabajo y adaptaciones de este tienen el potencial de convertirse en una herramienta para evaluar políticas o tendencias específicas asociadas a la seguridad alimentaria en México y en otros países con economías emergente, siempre que sea enmarcado y robustecido a través de la teoría de sistemas socioecológicos, y construido para cada contexto particular. El marco de los sistemas socioecológicos como enfoque conceptual resulta útil y asertivo para abordar las problemáticas derivadas de la estructura del sistema agroalimentario que incluye a los actores, elementos (insumos, procesos, infraestructuras, instituciones, entre otros), actividades relacionadas con la producción, elaboración, distribución, preparación,

consumo y disposición de residuos derivados del sector, condiciones socioeconómicas y biofísicas esencialmente contexto-específicas.

- El modelo conceptual construido en este estudio es el primer esfuerzo para abordar el tema de la seguridad alimentaria enfatizando en las realidades contextuales de la población rural de las distintas ecorregiones de México, integradas y analizadas usando modelo de ecuaciones estructurales. Derivado de dicha metodología, este trabajo representa una contribución al enfoque de la seguridad alimentaria a través una aproximación estadística que se ha utilizado en pocos casos de estudio, y que es considerada relevante por su carácter integrador (Calancie et al., 2018; Denny et al., 2018; King, 2018). Además, contribuye en la reflexión sobre la composición de las variables predictoras y las potenciales relaciones entre ellas, usualmente determinadas por complejos circuitos de retroalimentación a nivel local, regional y global.
- La tesis pone sobre la mesa la necesidad de caracterizar el papel de la pequeña agricultura y fortalecer la seguridad alimentaria de la población rural de países emergentes en donde existen múltiples realidades socioecológicas. En relación con eso, el desigual desarrollo económico entre las diferentes ecorregiones de México requiere una serie de estrategias que reactiven los territorios en función del uso de recursos y sus ventajas productivas y competitivas para tener un bienestar consistente. Se sugiere que las nuevas políticas-estrategias territoriales alimentarias deberían:
 - a) Promover la producción de alimentos saludables, enfatizando en el apoyo a los productores de sistemas que hagan parte de esquemas de agricultura familiar, en donde es posible potenciar las metas de protección y restauración de esos servicios ecosistémicos de los que depende directamente el campo mexicano e indirectamente la creciente población que habita en las ciudades (Opdam, 2018).
 - b) Eficientizar la comercialización, distribución y el procesamiento de los alimentos de alto valor nutricional, priorizando los productos provenientes de la pequeña y mediana agricultura a través de mecanismos inclusivos socialmente, viables económicamente y de menor impacto ambiental.
 - c) Apoyar estrategias que posibiliten el acceso a dietas saludables para todas las personas en todo el territorio del país, especialmente de la población más vulnerable. Sostenemos que potenciar el establecimiento de paisajes sostenibles es la vía para que México proteja su riqueza natural, mejore las condiciones de vida en el campo, asegure la seguridad alimentaria y disminuya los problemas asociados al consumo amplio de productos procesados y altos en azúcares y grasas saturadas (Zhou & Anderies, 2019).
- Siendo testigos de una de las crisis sanitarias más grandes de la época moderna potenciada en gravedad por las epidemias de sobrepeso, obesidad y diabetes, las iniciativas gubernamentales deben buscar reducir al mínimo todas las formas de malnutrición mediante el fomento de hábitos de alimentación saludables. Sin embargo, alcanzar un sistema agroalimentario sostenible requerirá la coordinación entre varios sectores para encaminar transformaciones

contextuales partiendo de una visión sistémica. Si bien los programas de política pública pueden enfocar la atención en problemas específicos sectoriales como la malnutrición, el deterioro ambiental o la exclusión productiva, la falta de una visión integral y coordinación sectorial pueden desembocar en fracasos y detonar impactos neutralizados e incluso negativos. Para evitar las fallas en el planteamiento y ejecución de las estrategias, es necesario abordar la seguridad alimentaria de las ciudades y de las zonas rurales con la misma urgencia y conciliar la voluntad política con la co-responsabilidad de los diferentes sectores y actores de la sociedad.

6.3 Replicabilidad de los análisis

- Más allá del valor resultante del análisis de tendencias a nivel de ecorregión y el índice FEE para México, estas aproximaciones metodológicas resultaron útiles para confirmar o corregir tendencias tradicionales de un solo factor detectadas por el análisis a nivel nacional. Estas herramientas son replicables con datos oficiales similares o actualizados para la evaluación futura de la seguridad alimentaria y la protección del medio ambiente; y quizás sean más adecuadas para la aplicación y evaluación de políticas que las herramientas analíticas existentes. El cálculo aritmético del índice FEE lo hace escalable a otros factores de seguridad alimentaria, por ejemplo, tipos de pobreza, seguridad nutricional dentro de la autosuficiencia alimentaria, entre otros (Poulsen et al., 2015; Crist et al., 2017), permitiendo experimentar mejoras en la calidad del índice o adaptarlo a contextos mapeados a mejor resolución. Además, la solidez del índice FEE puede mejorarse cuando se estima y conoce la precisión de los mapas nacionales LUVIC y los mapas de cambio correspondientes en México; esto podría lograrse utilizando métodos de evaluación de precisión desarrollados para México que ya han sido implementados en cartografía nacional (Couturier et al., 2010; 2012, Mas et al., 2016). Debido a que el índice FEE es integrador (multifactorial) y más sensible a la incertidumbre de los datos que el análisis de tendencias, se sugiere que ambos pueden ser aplicados como herramientas complementarias que podrían proporcionar una línea de base útil para la seguridad alimentaria y las tendencias de uso de la tierra en países tropicales y subtropicales con desafíos socioeconómicos y ambientales similares. En este caso, el índice FEE se propone como complemento de los índices de seguridad alimentaria existentes a nivel nacional para México (programa de Monitoreo Global de la Meta del Hambre de la FAO o Índice de Seguridad Alimentaria Global de la Unidad de Inteligencia de The Economist) o los esfuerzos nacionales como la aproximación de CONEVAL y la ENSANUT.
- Los modelos de ecuaciones estructurales usados como parte de los métodos del presente trabajo, son replicables y adaptables para países que cuenten con información oficial a distintas escalas de análisis. Aunque las relaciones propuestas en el mapa mental inicial pueden ser un punto de partida para países con realidades socioecológicas similares, es importante mencionar que fueron pensadas para el contexto rural de México; por ello, los estudios que pretendan usar el modelo propuesto con fines parecidos, tendrán que reformular las potenciales interacciones entre variables que dan forma a sus propias estructuras agrícolas y dan contexto a territorios particulares de interés. Por otra parte, se sugiere la exploración de modelos de ecuaciones estructurales espaciales (Damgaard, 2019), pues la metodología empleada en el presente trabajo combina el análisis factorial y análisis de regresión sin contemplar de forma explícita la

distribución espacial de los datos. La nueva generación de modelos espaciales será de utilidad al hacer explícito el proceso espacial multivariado a través de un modelo lineal de co-regionalización (análisis de varianza/covarianza estimado a través de diversos rangos de distancias). Además, animamos a explorar los alcances de la modelación de dinámica de sistemas (Stermán, 2010) para tener una aproximación a las relaciones no lineales y con múltiples ciclos de causalidad.

6.4 Perspectivas

- Existen limitaciones y retos en la implementación de los índices a nivel ecorregión para la formulación de políticas públicas apuntaladas hacia los sistemas agroalimentarios. Dentro de ellas se pueden destacar la diversidad de los tipos de propiedad de la tierra, la disparidad de los antecedentes socioeconómicos y étnicos dentro de una misma ecorregión y la presión demográfica rural. En ese sentido, explorar un nivel de agregación de mayor fineza podría ayudar a capturar la diversidad socioecológica inherente a las ecorregiones de México. La gran heterogeneidad dentro de las ecorregiones en un sentido práctico, podría dificultar la participación de múltiples actores, especialmente de aquellos que tienen un conocimiento e influencia netamente local. Insistimos en la utilidad para el análisis de conductores, enmarcar la complejidad inherente a la diversidad de realidades a través del enfoque de los sistemas socioecológicos, tal y como lo han implementado en algunos estudios anteriores en el país (Castellarini et al., 2014; Leslie et al., 2015).
- Es indispensable mencionar que en investigaciones futuras el índice de eficiencia alimentaria-ambiental tendrá que ser ajustado de tal forma que incorpore el uso de los alimentos y con ello se obtenga un espectro más amplio de los componentes de seguridad alimentaria; además de explorar una reagrupación a nivel estatal que pueda servir como una herramienta para los tomadores de decisiones.
- Dentro de las limitaciones de la propuesta conceptual y analítica explorada a través de modelos de ecuaciones estructurales, debe enfatizarse la temporalidad de ciertas fuentes asociadas con la estructura del sistema agrícola, como es el caso de los censos agropecuario y ejidales del INEGI que data de 2007, lo que pone en discusión el alcance de los resultados obtenidos respecto a la dinámica actual. Sin embargo, esta fuente de datos fue incluida por ser la más reciente obtenida para todo el país y porque se considera trascendental y útil por las siguientes razones:
 - a) Aborda una amplia diversidad de temas, no solo en el tema de producción y productividad de las unidades de producción en México, sino en las características socioeconómicas de estas.
 - b) Tiene una agregación espacial fina que permite caracterizar territorios rurales de 1,000 hectáreas en promedio. El modelo propuesto se puede utilizar como línea base para identificar procesos de cambio una vez se levante el nuevo censo agropecuario y ejidal. En otras palabras, para actualizar y/o modificar el índice FEE propuesto, y robustecer los

resultados obtenidos a través de los modelos de ecuaciones estructurales, es indispensable que las instituciones públicas como SADER e INEGI, generen y publiquen con mayor frecuencia datos más detallados y de mejor resolución espacial sobre el sistema agroalimentario, enfatizando en la información asociada a la agricultura en pequeña escala, estrategias de producción de medios de vida, y patrones de consumo como se especifica en algunos formatos de censo anteriores (por ejemplo, censo de producción de café; censo agropecuario).

- El índice FEE y el modelo conceptual y analítico propuesto tendrán que insertarse en un trabajo interdisciplinario con especialistas en ecología, agronomía, sociología, epidemiología y salud pública. Esto permitirá, por un lado, co-construir y afinar el planteamiento de los factores relacionados con la seguridad alimentaria que reflejen las realidades multidisciplinares; y por otro lado, incrementar el potencial de incidencia y promover el impostergable tránsito hacia la investigación-acción para el desarrollo territorial.

Referencias Generales

- Abson, D. J., Dougill, A. J., & Stringer, L. C. (2012a). Using principal component analysis for information-rich socio-ecological vulnerability mapping in Southern Africa. *Applied Geography*, 35(1-2), 515-524.
- Abson, D. J., Dougill, A. J., & Stringer, L. C. (2012b). Spatial mapping of socio-ecological vulnerability to environmental change in Southern Africa. *Appl. Geogr*, 35(515), e524.
- Abúndez, C. O., Cázares, G. N., Cordero, C. J. F. R., Zetina, D. A. D., Angona, S. R., de Voghel Gutiérrez, S., & Rivera-Dommarco, J. (2006). Encuesta nacional de salud y nutrición 2006. Instituto Nacional de Salud Pública.
- Acevedo, M. 2011. Interdisciplinary progress in food production, food security and environment research. *Environmental Conservation*, 38(2), 151–171.
- Acuña, I. T., Murillo, M. P., & Salinas, F. A. (2013). Pobreza, medios de vida y seguridad alimentaria. El caso de los municipios de Aguadas y Palestina, Caldas, Colombia. *Sociedad y Economía*, (24), 231-261.
- Adger, W., Hughes, T., Folke, C., Carpenter, S., & Rockström, J. (2005). Social-Ecological Resilience to Coastal Disasters. En *Science* (New York, N.Y.) (Vol. 309).
- Alexandratos N, Bruinsma J. (2012). World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 Revision. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma
- Ali, T. (2018). Impact of Natural Resource and Resilience (Climate changes and resource depletion) on global Food Security challenges: A comparative study of emerging and developed economies of the world. *International Journal of Agriculture and Economic Development*, 6(1), 1.
- Allen TFH & Starr TB (1982) Hierarchy: perspectives for ecological complexity. University of Chicago Press, Chicago
- Alston, J. M. and P. G. Pardey. (2014). Agriculture in the Global Economy. *Journal of Economic Perspectives* 28(1):121–146.
- Altieri, M. A., Funes-Monzote, F. R., & Petersen, P. (2012). Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 1-13.
- Anderson, K. (2010). Globalization's effects on world agricultural trade, 1960–2050. *Phil. Trans. R. Soc. B* 365, 3007–3021. (doi:10.1098/rstb.2010.0131)
- Antoni, C., Huber-Sannwald, E., Hernández, H. R., van't Hooft, A., & Schoon, M. (2019). Socio-ecological dynamics of a tropical agricultural region: Historical analysis of system change and opportunities. *Land use policy*, 81, 346-359.
- Aráuz, A. F. (2015). Aplicación del análisis factorial confirmatorio a un modelo de medición del rendimiento académico en lectura. *Revista de Ciencias Económicas*, 39-65.
- Assembly, G. (2015). sustainable Development goals. *SDGs*, *Transforming our world: the, 2030*.
- Audouin, M., R. Preiser, S. Nienaber, L. Downsborough, J. Lanz, and S. Mavengahama. (2013). Exploring the implications of critical complexity for the study of social-ecological systems. *Ecology and Society* 18(3):12. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-05434-180312>
- Ávila Foucat, V. S., & Perevochtchikova, M. (2019). Sistemas socioecológicos: marcos analíticos y estudios de caso en Oaxaca, México.

Ávila-Foucat, V. S., & Rodríguez-Robayo, K. J. (2018). Determinants of livelihood diversification: The case wildlife tourism in four coastal communities in Oaxaca, Mexico. *Tourism Management*, 69, 223-231.

Bac, D.P. (2008). *A history of the concept of sustainable development: literature review*. University of Oradea.

Balvanera, P., Cotler, H., Aburto, O., Aguilar, A., Aguilera, M., Aluja, M., Ávila, P., (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. *Capital natural de México* 2, 185–245.

Banos-González, I., Martínez-Fernández, J., & Esteve-Selma, M. Á. (2015). Dynamic integration of sustainability indicators in insular socio-ecological systems. *Ecological Modelling*, 306, 130-144.

Barnaud, C., Le Page, C., Dumrongrojwatthana, P., & Trébuil, G. (2013). Spatial representations are not neutral: Lessons from a participatory agent-based modelling process in a land-use conflict. *Environmental Modelling & Software*, 45, 150-159.

Barton, C. M., Ullah, I. I., & Bergin, S. (2010). Land use, water and Mediterranean landscapes: modelling long-term dynamics of complex socio-ecological systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1931), 5275-5297.

Basurto, X. and M. Nenadovic. (2012). A Systematic Approach to Studying Fisheries Governance. *Global Policy* 3(2):222–230.

Basurto, X., S. Gelcich, and E. Ostrom. (2013). The Social-ecological System Framework as a Knowledge Classificatory System for Benthic Small-scale Fisheries. *Global Environmental Change* 23(6):1366–1380.

Batterbury SPJ, Bebbington A (1999) Environmental histories: Access to resources and landscape change. *Land Degrad Dev* 10:279–289

Behera, R. N., Nayak, D. K., Andersen, P., & Måren, I. E. (2016). From jhum to broom: Agricultural land-use change and food security implications on the Meghalaya Plateau, India. *Ambio*, 45(1), 63-77.

Bentler, P. M. and Bonett, D. G. (1980). Significance tests and goodness of fit in the analysis of covariance structures. *Psychological Bulletin*, 88: 588–606.

Berkes, F. (2017). *Environmental Governance for the Anthropocene? Social-Ecological Systems, Resilience, and Collaborative Learning*. *Sustainability* 9(7). <https://doi.org/10.3390/su9071232>

Bermeo, A., Couturier, S., (2017). Assessment of the potential enhancement of rural food security in Mexico using land use classification on medium resolution satellite imagery. *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 54, 1–7 012006.

Bermeo, A., Couturier, S., & Pizaña, M. G. (2014). Conservation of traditional smallholder cultivation systems in indigenous territories: Mapping land availability for milpa cultivation in the Huasteca Poblana, Mexico. *Applied geography*, 53, 299-310.

Biggs, R., C. Rhode, S. Archibald, L. M. Kunene, S. S. Mutanga, N. Nkuna, P. O. Ocholla, and L. J. Phadima. (2015b). Strategies for managing complex social-ecological systems in the face of uncertainty: examples from South Africa and beyond. *Ecology and Society* 20(1):52. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-07380-200152>

Biggs, R., M. Schlüter, D. Biggs, E. L. Bohensky, S. BurnSilver, G. Cundill, V. Dakos, T. M. Daw, L. S. Evans, K. Kotschy, A. M. Leitch, C. Meek, A. Quinlan, C. Raudsepp-Hearne, M. D. Robards, M. L. Schoon, L. Schultz, and P. C. West. (2012). Toward principles for enhancing the resilience of ecosystem services. *Annual Review of Environment and Resources* 37(1):421-448. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-051211-123836>

- Binder, C. R., J. Hinkel, P. W. G. Bots, and C. Pahl-Wostl. (2013). Comparison of frameworks for analyzing social-ecological systems. *Ecology and Society* 18(4).
- Blam, Y., L. Carlsson, and M.-O. Olsson. (2000). *Institutions and the Emergence of Markets: Transition in the Irkutsk Forest Sector*. Laxenburg, Australia: International Institute for Applied Systems Analysis.
- Bodin, Ö. (2017). Collaborative environmental governance: achieving collective action in social-ecological systems. *Science* 357(6352).<http://dx.doi.org/10.1126/science.aan1114>
- Bommarco, R., Vico, G., & Hallin, S. (2018). Exploiting ecosystem services in agriculture for increased food security. *Global food security*, 17, 57-63.
- Bonilla-Moheno, M., Redo, R., Aide, T., Clark, M., Grau, H., (2013). Vegetation change and land tenure in Mexico: a country-wide analysis. *Land Use Policy* 30, 355–364.
- Brownlee, J. (2007) *Complex adaptive systems*. Technical Report 070302^a, Complex Intelligent Systems Laboratory, Centre for Information Technology Research. Swinburne University of Technology Melbourne.
- Bruckner, M., Fischer, G., Tramberend, S., & Giljum, S. (2015). Measuring telecouplings in the global land system: A review and comparative evaluation of land footprint accounting methods. *Ecological Economics*, 114, 11-21.
- Burch, D., & Lawrence, G. (2007). Supermarkets and agri-food supply chains: transformations in the production and consumption of foods. *Supermarkets and agri-food supply chains: transformations in the production and consumption of foods*.
- Cabral, L., Favareto, A., Mukwereza, L., & Amanor, K. (2016). Brazil's agricultural politics in Africa: More food international and the disputed meanings of "family farming". *World Development*, 81, 47-60.
- Calancie, L., Allen, N. E., Ng, S. W., Weiner, B. J., Ward, D. S., Ware, W. B., & Ammerman, A. S. (2018). Evaluating food policy councils using structural equation modeling. *American journal of community psychology*, 61(1-2), 251-264.
- Campos-Pérez, W., González-Becerra, K., Ramos-López, O., Silva-Gómez, J.A., BarrónCabrera, E., Roman, S., Panduro, A., Martínez-López, E., (2016). Same dietary but different physical activity pattern in normal-weight and overweight mexican subjects. *J. Food Nutr. Res.* 4 (11), 729–735.
- Cangur, S., & Ercan, I. (2015). Comparison of model fit indices used in structural equation modeling under multivariate normality. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 14(1), 14.
- Capra, F. (2005). Complexity and life. *Theory, Culture & Society* 22(5):33-44. <http://dx.doi.org/10.1177/0263276405057046>
- Capra, F., and P. L. Luisi. (2014). *The systems view of life*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511895555>
- Cassman K, Wood S, Choo PS, Dixon J, Gaskell J, Khan S, Lal R, Pretty J, Primavera J, Ramankutty N, Viglizzo E, Kadungure S, Kanbar N, Porter S, Tharme R (2005) Cultivated systems. In: Scholes R, Rashid H (eds) Millennium Ecosystem Assessment: Working group on conditions and trends. Island Press, Washington D.C.
- Castellarini, F., Siebe, C., Lazos, E., de la Tejera, B., Cotler, H., Pacheco, C., Boege, E., Moreno, R., Saldívar, A., Larrazábal, A., Galán, C., Casado, J., Balvanera, P., (2014). A social-ecological spatial framework for policy design towards sustainability: mexico as a study case. *Investigación Ambiental* 6 (2).

Castro, H., & Reboratti, C. (2008). Revisión del concepto de ruralidad en la Argentina y alternativas posibles para su redefinición. Serie de estudios de investigaciones 15, Buenos Aires, Secretaría Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos.

Charney J, Stone PH (1975) Drought in the Sahara: A biogeophysical feedback mechanism. *Science* 187:434–435

Cilliers, P. (1998). *Complexity and postmodernism: understanding complex systems*. Routledge, London, UK.

Cilliers, P. (2002). Why we cannot know complex things completely. *Emergence* 4(1):77-84. <http://dx.doi.org/10.1080/15213250.2002.9687736>

Cilliers, P., H. C. Biggs, S. Blignaut, A. G. Choles, J. S. Hofmeyr, G. P. W. Jewitt, and D. J. Roux. (2013). Complexity, modeling, and natural resource management. *Ecology and Society* 18(3):1. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-05382-180301>

Cioffi-Revilla, C. (2016). Socio-Ecological Systems.

Clapp, J., (2017). Food self-sufficiency: making sense of it, and when it makes sense. *Food Policy* 66, 88–96.

Claramunt, C., & Theriault, M. (1996). Toward semantics for modelling spatio-temporal processes within GIS. *Advances in GIS Research* 1, 27-43.

Claramunt, C. C. Parent, y M. Thériault, (1997) Design patterns for spatio-temporal processes. En: Spaccapietra y F. Maryanski (eds.). *Searching for semantics: data mining, reverse engineering*. E.U.A., Chapman & Hall, pp. 415-428.

Claramunt, C., & Jiang, B. (2000). A representation of relationships in temporal spaces. In *GIS and Geocomputation* (pp. 53-66). CRC Press.

Clay, E. (2002). Food security: concepts and measurement. *Trade reforms and food security: Conceptualising the linkages*, 2002, 25-34.

CMMAD (1987). *Our Common Future (Brundtland Report)*. Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Naciones Unidas.

COMISIO, N. D. C. N. A. (1997). Regiones ecológicas de América del Norte. Comisión Cooperación Ambiental, México.

CONAFOR, 2019. Website. <https://www.gob.mx/conafor>

Coneval, (2019). Medición de la Pobreza. Disponible en: <https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza-2018.aspx>. (último acceso Agosto 2019).

Consejo Nacional de Población (México). (1994). Índice de marginación por entidad federativa y municipio 1990, Colección: Índices Sociodemográficos, Consejo Nacional de Población, México D.F.

Consejo Nacional de Población (México). (2011). Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2010, Colección: Índices Sociodemográficos, Consejo Nacional de Población, México D.F.

Consejo Nacional de Población (México). (2012). Índice de marginación por localidad 2010, Colección: Índices Sociodemográficos, Consejo Nacional de Población, México D.F.

- Couturier, S., Mas, J.F., López-Granados, E., Benítez, J., Coria-Tapia, V., Vega-Guzmán, Á., (2010). Accuracy assessment of the Mexican National Forest Inventory map: a study in four ecogeographical areas. *Singapore J. Trop. Geogr.* 31 (2), 163–179.
- Couturier, S., Núñez, J.-M., Kolb, M., (2012). Measuring tropical deforestation with error margins: A method for REDD monitoring in South-Eastern Mexico. In: Sudarshana, Padmini (Ed.), *Tropical Forests*. Intech Open Access Publishing, pp. 269–296.
- Crist, E., Mora, C., Engelman, R., (2017). The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science* 356 (6335), 260–264.
- Crist, E., Mora, C., Engelman, R., (2017). The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science* 356 (6335), 260–264.
- Cuéllar, J.A., (2011). Programa de seguridad alimentaria: experiencias en México y otros países.
- Damgaard, C. (2019). Spatio-Temporal Structural Equation Modeling in a Hierarchical Bayesian Framework: What Controls Wet Heathland Vegetation?. *Ecosystems*, 22(1), 152-164.
- Daron, J. D., Sutherland, K., Jack, C., & Hewitson, B. C. (2015). The role of regional climate projections in managing complex socio-ecological systems. *Regional Environmental Change*, 15(1), 1-12.
- De Haen, H., Klasen, S., & Qaim, M. (2011). What do we really know? Metrics for food insecurity and undernutrition. *Food Policy*, 36(6), 760-769.
- De Laurentiis, V., Hunt, D. V., & Rogers, C. D. (2016). Overcoming food security challenges within an energy/water/food nexus (EWFN) approach. *Sustainability*, 8(1), 95.
- DeFries RS, Asner GP, Houghton RA (eds) (2004) *Ecosystems and land use change*. Geophysical Monograph 153. American Geo- physical Union, Washington D.C.
- DeKoninck R, Dery S (1997) Agricultural expansion as a tool of population redistribution in Southeast Asia. *J Southe Asian Stud* 28(1):1–26
- Denny, R. C., Marquart-Pyatt, S. T., Ligmann-Zielinska, A., Olabisi, L. S., Rivers, L., Du, J., & Liverpool-Tasie, L. S. O. (2018). Food security in Africa: a cross-scale, empirical investigation using structural equation modeling. *Environment Systems and Decisions*, 38(1), 6-22.
- Devaux, A., D. Horton, C. Velasco, G. Thiele, G. López, T. Bernet, I. Reinoso, and M. Ordinola. (2009). Collective Action for Market Chain Innovation in the Andes. *Food Policy* 34:31–38.
- Diario de la Federación (2012). Ley de Desarrollo Rural Sustentable. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, México.
- Díaz-Carreño, M. Á., Sánchez-León, M., & Díaz-Bustamente, A. (2016). Inseguridad alimentaria en los estados de México: un estudio de sus principales determinantes. *Economía, sociedad y territorio*, 16(51), 459-483.
- Dirección General de Información en Salud (DGIS). (2019). Sistema de Información de la Secretaría de Salud [en línea]. México: Secretaría de Salud. Disponible en: <http://www.dgis.salud.gob.mx>
- Dvorak, B., Volder, A., (2010). Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review. *Landscape Urban Plann.* 96, 197–213.
- Epstein, G., J. M. Vogt, S. K. Mincey, M. Cox, and B. Fischer. (2013). Missing Ecology: Integrating Ecological Perspectives with the Social-ecological System Framework. *International Journal of the Commons* 7(2):432–453.

- Ericksen, P. J. (2008a). Conceptualizing food systems for global environmental change research. *Global environmental change*, 18(1), 234-245.
- Ericksen, P. J. (2008b). What is the vulnerability of a food system to global environmental change?. *Ecology and Society*, 13(2).
- Ericksen, P. J., Ingram, J. S., & Liverman, D. M. (2009). Food security and global environmental change: emerging challenges.
- Ericksen, P., Stewart, B., Dixon, J., Barling, D., Loring, P., Anderson, M., & Ingram, J. (2012). The value of a food system approach. In *Food security and global environmental change* (pp. 45-65). Routledge.
- FAO. (1983). *World Food Security: a Reappraisal of the Concepts and Approaches*. Director General's Report. Rome.
- FAO. (1996). Rome Declaration on World Food Security and World Food Summit Plan of Action. World Food Summit 13-17 November 1996. Rome.
- FAO, (1999). Implications of Economic Policy for Food Security: A Training Manual. at: <http://www.fao.org/docrep/004/x3936e/x3936e03.htm>.
- FAO (2002). *The State of Food Insecurity in the World 2001*. Rome.
- FAO (2004) FAOSTAT data. FAO, Rome, <http://apps.fao.org>
- FAO (2006). Food Security. Policy Brief Issue No. 2. FAO Food Security Program, Rome.
- FAO (2010). Evaluación De Los Recursos Forestales Mundiales 2010: Informe Principal (Informe General). FRA2010/041. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma, Italia, pp. 346.
- FAO, (2019). El sistema alimentario en México - Oportunidades para el campo mexicano en la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible. Ciudad de México. 68 pp.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. (2019). The State of Food Security and Nutrition in the World 2019. Safeguarding against economic slowdowns and downturns. Rome, FAO.
- FAO-SAGARPA. (2012). Agricultura familiar con potencial productivo en México. FAO.
- FAO, W. F. P. IFAD (2012). The state of food insecurity in the world 2012. Economic Growth is necessary but not Sufficient to Accelerate Reduction of Hunger and Malnutrition. FAO, Rome, Italy, 1-61.
- FAO. (2015). El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo. Cumplimiento de los objetivos internacionales para 2015 en relación con el hambre: balance de los desiguales progresos. Roma. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i4646s.pdf>.
- FAO. (2017). América Latina y el Caribe: panorama de la seguridad alimentaria y nutricional. Sistemas alimentarios sostenibles para poner fin al hambre y la malnutrición.
- FAOSTAT (2018). FAOSTAT *Food Balance Sheets*. Accessed at: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>
- Feizizadeh, B., Pourmoradian, S., & Pourmoradian, S. (2015). Food security assessment based on GIS spatial analysis in the rural area of east azerbaijan province, Iran. *GI_Forum*, 2015, 475-483.
- Fenzl, N. (2017). Emergence and self-organization of complex systems: the role of energy flows and information a philosophical approach. *Complexitas - Rev. Fil. Tem.*, Belém, 2(1), pp. 31-45.

- Fiedler, J. L., Carletto, C., & Dupriez, O. (2012). Still waiting for Godot? Improving Household Consumption and Expenditures Surveys (HCES) to enable more evidence-based nutrition policies. *Food and Nutrition Bulletin*, 33(3_suppl2), S242-S251.
- Fierros, I., & Ávila-Foucat, V. S. (2017). Medios de vida sustentables y contexto de vulnerabilidad de los hogares rurales de México. *Problemas del desarrollo*, 48(191), 107-131.
- Filatova, T., Verburg, P. H., Parker, D. C., & Stannard, C. A. (2013). Spatial agent-based models for socio-ecological systems: challenges and prospects. *Environmental modelling & software*, 45, 1-7.
- Fischer, J., Abson, D. J., Butsic, V., Chappell, M. J., Ekroos, J., Hanspach, J., ... & von Wehrden, H. (2014). Land sparing versus land sharing: moving forward. *Conservation Letters*, 7(3), 149-157.
- Fischer, J., T. A. Gardner, E. M. Bennett, P. Balvanera, R. Biggs, S. Carpenter, T. Daw, C. Folke, R. Hill, T. P. Hughes, T. Luthe, M. Maass, M. Meacham, A. V. Norström, G. Peterson, C. Queiroz, R. Seppelt, M. Spierenburg, and J. Tenhunen. (2015). Advancing sustainability through mainstreaming a social- ecological systems perspective. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 14:144-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2015.06.002>
- Fisher, J.A., Patenaude, G., Meir, P., Nightingale, A.J., Rounsevell, M.D., Williams, M., Woodhouse, I.H., (2013). Strengthening conceptual foundations: analysing frameworks for ecosystem services and poverty alleviation research. *Global Environ. Change* 23 (5), 1098–1111.
- Fleischman, F. D., K. Boenning, G. A. Garcia-Lopez, S. Mincey, M. Schmitt- Harsh, K. Daedlow, M. C. Lopez, X. Basurto, B. Fischer, and E. Ostrom. (2010). Disturbance, Response, and Persistence in Self-organised Forested Communities: Analysis of Robustness and Resilience in Five Communities in Southern Indiana. *Ecology and Society* 15(4):9.
- Flinkman, M. (2004). Institutions and Wood Supply to Construction Wood Markets in Dar es Salaam and Mwanza: Implications for Policy and Enforcement. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(Suppl. 4):25–35.
- Flores, M. (2013). Producción agrícola, seguridad alimentaria y desarrollo rural en México. Cuadernos de Investigación en Desarrollo.
- Foley, J.A. et al. (2005) Global consequences of land use. *Science* 309, 570–574
- Foley, J. A., G. P. Asner, M. H. Costa, M. T. Coe, R. DeFries, H. K. Gibbs, E. A. Howard, S. Olson, J. Patz, N. Ramankutty, and P. Snyder. (2007). Amazonian revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin. *Frontiers in Ecology and Environment* 5(1):25–32.
- Foley, J. A., R. DeFries, G. P. Asner, C. Barford, G. Bonan, S. R. Carpenter, F. S. Chapin, III, M. T. Coe, G. C. Daily, H. K. Gibbs, J. H. Helkowski, T. Holloway, E. A. Howard, C. J. Kucharik, C. Monfreda, J. A. Patz, I. C. Prentice, N. Ramankutty, and P. K. Snyder. (2005). Global consequences of land use. *Science* 309:570–574.
- Folke, C., R. Biggs, A. V. Norström, B. Reyers, and J. Rockström. (2016). Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science. *Ecology and Society* 21(3):41. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-08748-210341>
- Folke, C., Å. Jansson, J. Rockström, P. Olsson, S. R. Carpenter, F. S. Chapin III, A.-S. Crépin, G. Daily, K. Danell, J. Ebbesson, T. Elmqvist, V. Galaz, F. Moberg, M. Nilsson, H. Österblom, E. Ostrom, Å. Persson, G. Peterson, S. Polasky, W. Steffen, B. Walker, and F. Westley. (2011). Reconnecting to the Biosphere. *Ambio* 40 (7):719-738. <http://dx.doi.org/10.1007/s13280-011-0184-y>

- Folke, C., Carpenter, S.R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T. y Rockström, J. (2010). *Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability*. *Ecology and Society* 15, 4, 20.
- Frayne, B. & McCordic, C., (2015). Planning for food secure cities: measuring the influence of infrastructure and income on household food security in Southern African cities. *Geoforum* 65, 1–11.
- French, S., Leyshon, A., & Thrift, N. (2009). A very geographical crisis: the making and breaking of the 2007–2008 financial crisis. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2(2), 287-302.
- Fuss, S., Havlík, P., Szolgayová, J., Schmid, E., Reuter, W.H., Khabarov, N., Kraxner, F., (2015). Global food security & adaptation under crop yield volatility. *Technol. Forecasting Social Change* 98, 223–233.
- Galeana-Pizaña, J. M., Couturier, S., & Monsivais-Huertero, A. (2018). Assessing food security and environmental protection in Mexico with a GIS-based Food Environmental Efficiency index. *Land Use Policy*, 76, 442-454.
- Gálvez, A. (2018). *Eating NAFTA: trade, food policies, and the destruction of Mexico*. Univ of California Press.
- García, G. A., & Mirón, C. G. (2014). El enfoque de las capacidades y las competencias transversales en el EEES. *Historia y comunicación social*, 18, 145-157.
- García, M. I. B., Enrique, V. I. L. A., & Tello, F. P. H. (2011). *Introducción básica al análisis factorial*. Editorial UNED.
- García-Urigüen, P., (2012). La alimentación de los mexicanos. Cambios Sociales y Económicos, y su Impacto en los Hábitos Alimenticios. Cámara Nacional de la Industria de la Transformación (CANACINTRA) DF, México.
- Garibaldi, L. A., Andersson, G. K., Requier, F., Fijen, T. P., Hipólito, J., Kleijn, D., ... & Rollin, O. (2018). Complementarity and synergisms among ecosystem services supporting crop yield. *Global food security*, 17, 38-47.
- Garrick, D., L. De Stefano, F. Fung, J. Pittock, E. Schlager, M. New, and D. Connell. (2013). Managing Hydroclimatic Risks in Federal Rivers: A Diagnostic Assessment. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 371(2002):20120415.
- Gaube, V., Remesch, A. (2013). Impact of urban planning on household's residential decisions: an agent-based simulation model for Vienna. *Environmental Modelling & Software* 45, 92e103.
- Godfray, H. C. J., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Nisbett, N., ... & Whiteley, R. (2010). The future of the global food system.
- Gómez, H. A. (1987). La autosuficiencia alimentaria en la política del estado mexicano. *Nueva Antropología*, 9(32), 129-150.
- Gómez, F. (2009). Análisis entre abasto y nutrición con base en la Encuesta Nacional de Abasto, Alimentación y Estado Nutricio en el Medio Rural, en Análisis de los patrones de gasto en alimentos y su disponibilidad en comunidades rurales. México.
- Gómez Oliver (2017). *Agricultura familiar: política de desarrollo con enfoque territorial*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gómez-Pompa, A., & Kaus, A. (1990). Traditional management of tropical forests in Mexico. *Alternatives to deforestation: steps towards sustainable use of the Amazon rain forest.*, 45-64.

- Gou, F., Liu, X., Ren, X., Liu, D., Liu, H., Wei, K., ... & Li, J. (2017). Socio-ecological factors and hand, foot and mouth disease in dry climate regions: a Bayesian spatial approach in Gansu, China. *International journal of biometeorology*, 61(1), 137-147.
- Grau, R., Kuemmerle, T., & Macchi, L. (2013). Beyond 'land sparing versus land sharing': environmental heterogeneity, globalization and the balance between agricultural production and nature conservation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(5), 477-483.
- Greene, C., Ferreira, G., Carlson, A., Cooke, B., & Hitaj, C. (2017). Growing organic demand provides high-value opportunities for many types of producers. *Amber Waves*, 1.
- Guillén, A. (2012). México hacia el siglo xxi: crisis y modelo económico alternativo, 2a. ed., México, Plaza y Valdés Editores.
- Gutierrez, J. P., Rivera-Dommarco, J., Shamah-Levy, T., Villalpando-Hernández, S., Franco, A., Cuevas-Nasu, L., & Hernández-Ávila, M. (2012). Encuesta nacional de salud y nutrición 2012. Resultados Nacionales. Cuernavaca, México: Instituto Nacional de Salud Pública, 1(1.48).
- Hamilton, J. D. (1994). Time series analysis (Vol. 2, pp. 690-696). Princeton, NJ: Princeton university press.
- Hammond, D. (2005). Philosophical and ethical foundations of systems thinking. *tripleC* 3(2):20-27. <http://dx.doi.org/10.31269/triplec.v3i2.20>
- Hammond, R. A. and L. Dube. (2012). A Systems Science Perspective and Transdisciplinary Models for Food and Nutrition Security. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(31):12356–12363.
- Hanspach, J., T. Hartel, A. I. Milcu, F. Mikulcak, I. Dorresteijn, J. Loos, H. von Wehrden, T. Kuemmerle, D. Abson, A. Kovács-Hostyánszki, A. Báldi, & J. Fischer. (2014). A holistic approach to studying social-ecological systems and its application to southern Transylvania. *Ecology and Society* 19(4) <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06915-190432>
- Harini, R., & Susilo, B. (2017). Food Security Assessment: A GIS-based Mapping of Food Sufficiency in Kalimantan Utara, Indonesia. In *International Conference on Studies in Disaster Management, Civil and Architectural Engineering (SDMCAE-17)* (pp. 18-19).
- Henneberry, S. R., & Díaz Carrasco, C. P. (2014). Global food security: Emerging economies and diverging food markets. *Journal of Food Distribution Research*, 45(856-2016-58131), 29-34.
- Herrero, M. T., Mason-D'Croz, D., Godde, C. M., Palmer, J., Thornton, P. K., & Gill, M. (2018). Livestock, land and the environmental limits of animal source-food consumption.
- Herrero, M., Thornton, P. K., Power, B., Bogard, J. R., Remans, R., Fritz, S., ... & Watson, R. A. (2017). Farming and the geography of nutrient production for human use: a transdisciplinary analysis. *The Lancet Planetary Health*, 1(1), e33-e42.
- Heylighen, F. (2008). Complexity and self-organization. In Bates & Maack. Eds. *Encyclopedia of Library and Information Sciences*. Taylor and Francis.
- Holden, S. T., & Ghebru, H. (2016). Land tenure reforms, tenure security and food security in poor agrarian economies: Causal linkages and research gaps. *Global Food Security*, 10, 21-28.
- Holland, J.H. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Addison-Wesley, Reading.
- Holland, H.H. (2006). *Studying complex adaptive systems*. *Jrl Syst Sci & Complexity* 19, pp. 1–8.

- Holling, C. S. (1973). *Resilience and Stability of Ecological Systems*. Annual Review of Ecology and Systematics 4(1), pp. 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Holling, C. S. (2002). *Resilience and adaptive cycles*. en L. H. Gunderson, and C. S. Holling, editors. Panarchy: understanding transformations in human and natural systems. Island Press, pp 25.62.
- Hori, K., Saito, O., Hashimoto, S., Matsui, T., Akter, R., & Takeuchi, K. (2020). *Projecting population distribution under depopulation conditions in Japan: scenario analysis for future socio-ecological systems* (pp. 1-17). Springer Japan.
- Horton, D., R. Oros, R. P. Ybarnegaray, G. López, C. Velasco, F. Rodriguez, E. Escobar, E. Rotondo, G. Hareau, and G. Thiele. (2011). *The Participatory Market Chain Approach: Experiences and Results in Four Andean Cases*. Lima, Peru: International Potato Center (CIP).
- Huato, M. Á. D., Arenas, O. R., Valverde, B. R., Reyes, L. L., Lezama, C. P., & León, A. C. (2014). Agricultura familiar y seguridad alimentaria entre productores de maíz de temporal en México. *Agroecología*, 9, 89-99.
- Hull, V., Taunmu, M.N. & Liu, J. (2015). *Synthesis of human-nature feedbacks*. Ecology and Society 20(3): 17. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-07404-200317>
- Hurni, H., Giger, M., Liniger, H., Studer, R. M., Messerli, P., Portner, B., ... & Breu, T. (2015). Soils, agriculture and food security: the interplay between ecosystem functioning and human well-being. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 15, 25-34.
- Ibarrola-Rivas, M. J., & Galicia, L. (2017). Rethinking Food Security in Mexico: Discussing the Need for Sustainable Transversal Policies Linking Food Production and Food Consumption. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2017(94), 106-121.
- Instituto Mexicano del Transporte (México). (2018). Red Nacional de Caminos: Documento técnico descriptivo. IMT. 55 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (México). (2017). Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y de vegetación: Escala 1: 250 000. Serie VI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016). Actualización del Marco Censal Agropecuario. Aguascalientes, México
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (México). (2013). Censo Agrícola, Ganadero y Forestal (2007): síntesis metodológica. INEGI. 63 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (México). (2011). Censo de Población y Vivienda 2010: marco conceptual. INEGI. 189 p.
- Isbell, F., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., ... & Ebeling, A. (2015). Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 526(7574), 574-577.
- Jarquín Sánchez, N. H., Castellanos Suárez, J. A., & Sangerman-Jarquín, D. M. (2017). Pluriactividad y agricultura familiar: retos del desarrollo rural en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(4), 949-963.
- Jones, A. D., Ngure, F. M., Pelto, G., & Young, S. L. (2013). What are we assessing when we measure food security? A compendium and review of current metrics. *Advances in Nutrition*, 4(5), 481-505.
- Kasperson JX, Kasperson RE, Turner BL II (eds) (1995) *Regions at risk: Comparisons of threatened environments*. United Nations University Press, Tokyo

Kasperson RE, Archer E, Caceres D, Dow K, Downing T, Elmqvist T, Folke C, Han G, Iyengar K, Vogel C, Wilson K, Ziervogel IG (2005) Vulnerable people and places. In: Scholes R, Rashid H (eds) Millenium Ecosystem Assessment. Working group on conditions and trends, Island Press, Washington D.C.

King, C. (2018). Food insecurity and housing instability in vulnerable families. *Review of Economics of the Household*, 16(2), 255-273.

Klennert, K. (2009). Achieving food and nutrition security. *Actions to Meet the Global Chal.*

Knoke, T., Calvas, B., Ochoa, S., Onyekwelu, J., Griess, V. (2013). Food production and climate protection- What abandoned lands can do to preserve natural forest. *Global Environ. Change* 23, 1064–1072.

Kogan, F. (2019). *Remote sensing for food security*. Springer International Publishing.

Kok, M., Lüdeke, M., Lucas, P., Sterzel, T., Walther, C., Janssen, P., ... & de Soysa, I. (2016). A new method for analysing socio-ecological patterns of vulnerability. *Regional Environmental Change*, 16(1), 229-243.

Koleff, P. y T. Urquiza-Haas (coords.). (2011). *Planeación para la conservación de la biodiversidad terrestre en México: retos en un país megadiverso*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad–Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México.

Koleff, P., M. Tambutti, I. J. March, R. Esquivel, C. Cantú, A. Lira-Noriega et al. (2009). Identificación de prioridades y análisis de vacíos y omisiones en la conservación de la biodiversidad de México, en *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Conabio. México, D.F. México. pp. 651-718.

Konan-Waidhet, A. B., Dibi, B., Kouadio, K. E., Savane, I., Nedeff, V., & Lazar, G. (2013). Improving food security using GIS database for mechanized rice farms management in Northwestern Cote d'Ivoire. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 12(1).

Koohafkan, P., Altieri, M. A., & Gimenez, E. H. (2012). Green agriculture: foundations for biodiverse, resilient and productive agricultural systems. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 10(1), 61-75.

Kremen, C. (2015). Reframing the land-sparing/land-sharing debate for biodiversity conservation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1355(1), 52-76.

Krishnamurthy, P.K., Lewis, K., Choularton, R.J. (2014). A methodological framework for rapidly assessing the impacts of climate risk on national-level food security through a vulnerability index. *Global Environ. Change* 25, 121–132.

La Rosa, D., Lorz, C., König, H. J., & Fürst, C. (2014). Spatial information and participation in socio-ecological systems: experiences, tools and lessons learned for land-use planning. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 7(6), 349.

Ladyman, J.L., & Wiesner, K. (2016). What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*. DOI: 10.1007/s13194-012-0056-8

Lai, K., & Green, S. B. (2016). The problem with having two watches: Assessment of fit when RMSEA and CFI disagree. *Multivariate behavioral research*, 51(2-3), 220-239.

Lambin EF, Geist HJ (guest eds) (2006) Focus: Land-use and land- cover change. IHDP Update – Newsletter of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change No. 3, August 2005

Lambin, E.F., B. L. Turner, J. Helmut, S.B Geist, S. B. Agbola, A. Arild et al. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, vol. 11, núm. 4, pp. 261-269.

- Lang, T., & Barling, D. (2012). Food security and food sustainability: reformulating the debate. *The Geographical Journal*, 178(4), 313-326.
- Lang, T., Barling, D., & Caraher, M. (2009). *Food policy: integrating health, environment and society*. OUP Oxford.
- Laterra, P., Barral, P., Carmona, A., & Nahuelhual, L. (2016). Focusing conservation efforts on ecosystem service supply may increase vulnerability of socio-ecological systems. *PLoS one*, 11(5), e0155019.
- Latham, M. C. (2002). *Nutrición humana en el mundo en desarrollo* (Vol. 29). Roma: Fao.
- Laurance, W. F., Sayer, J., & Cassman, K. G. (2014). Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. *Trends in ecology & evolution*, 29(2), 107-116.
- Lawrence, G., Lyons, K., & Wallington, T. (2013). *Food security, nutrition and sustainability*. Earthscan.
- Leathers, H. D., & Foster, P. (2004). *The world food problem: tackling the causes of undernutrition in the Third World* (No. Ed. 3). Lynne Rienner Publishers Inc.
- Lenormand, M., Luque, S., Langemeyer, J., Tenerelli, P., Zulian, G., Aalders, I., ... & van Eupen, M. (2018). Multiscale socio-ecological networks in the age of information. *PLoS one*, 13(11), e0206672.
- Lenton, T. M., Held, E., Kriegler, J. W., Hall, W., Lucht, S., Rahmstorf, and H. J. Schellnhuber. (2008). Tipping elements in Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105:1786–1793.
- Leonard, T.; McKillop, C.; Carson, J.A.; Shuval, K. Neighborhood effects on food consumption. *J. Behav. Exp. Econ.* 2014, 51, 99–113.
- Leslie, H.M., Basurto, X., Nenadovic, M., Sievanen, L., Cavanaugh, K.C., Cota-Nieto, J.J., Erisman, B.E., Finkbeiner, E., Hinojosa-Arango, G., Moreno-Báez, M., Nagavarapu, S., (2015). Operationalizing the social-ecological systems framework to assess sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112 (19), 5979–5984.
- Levin, S. A., Xepapadeas, A.-S. Crépin, J. Norberg, A. de Zeeuw, C. Folke, T. Hughes, K. Arrow, S. Barrett, G. Daily, P. Ehrlich, N. Kautsky, K.-G. Mäler, S. Polasky, M. Troell, J. R. Vincent, and B. Walker. (2013). Social-ecological systems as complex adaptive systems: modeling and policy implications. *Environment and Development Economics* 18(02):111-132. [http:// dx.doi.org/10.1017/S1355770X12000460](http://dx.doi.org/10.1017/S1355770X12000460)
- Lipper, L., & Zilberman, D. (2018). A short history of the evolution of the climate smart agriculture approach and its links to climate change and sustainable agriculture debates. In *Climate Smart Agriculture* (pp. 13-30). Springer, Cham
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Folke, C., Alberti, M., Redman, C. L., ... & Taylor, W. W. (2007). Coupled human and natural systems. *AMBIO: a journal of the human environment*, 36(8), 639-649.
- Liu, H. L., Willems, P., Bao, A. M., Wang, L., & Chen, X. (2016). Effect of climate change on the vulnerability of a socio-ecological system in an arid area. *Global and Planetary Change*, 137, 1-9.
- Lowder, S. K., Scoet, J., & Raney, T. (2016). The number, size, and distribution of farms, smallholder farms, and family farms worldwide. *World Development*, 87, 16-29.
- Luiselli, C. (2017). *Agricultura y alimentación en México: evolución, desempeño y perspectivas*. Siglo Veintiuno.
- Lustig, N., & Pérez Espejo, R. (1982). Sistema alimentario mexicano: antecedentes, características, estrategias y efectos. *Problemas del Desarrollo*, 247-286.

- Madrid-López, C., & Giampietro, M. (2015). The water metabolism of socio-ecological systems: Reflections and a conceptual framework. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), 853-865.
- Marohn, C., Schreinemachers, P., Quang, D. V., Berger, T., Siripalangkanont, P., Nguyen, T. T., & Cadisch, G. (2013). A software coupling approach to assess low-cost soil conservation strategies for highland agriculture in Vietnam. *Environmental Modelling & Software*, 45, 116-128.
- Marshall, G. R. (2005). *Economics for Collaborative Environmental Management: Renegotiating the Commons*. London: Earthscan.
- Martín-López, B., Palomo, I., García-Llorente, M., Iniesta-Arandia, I., Castro, A. J., Del Amo, D. G., ... & Montes, C. (2017). Delineating boundaries of social-ecological systems for landscape planning: A comprehensive spatial approach. *Land use policy*, 66, 90-104.
- Marshall, G. R. (2015). A social-ecological systems framework for food systems research: accommodating transformation systems and their products. *International Journal of the Commons*, 9(2), 881-908.
- McGinnis, M. D. and E. Ostrom. (2014). Social-ecological System Framework: Initial Changes and Continuing Challenges. *Ecology and Society* 19(2):30. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06387-190230>.
- Margules CR, Pressey RL. (2000). Systematic conservation planning. *Nature* 405: 243–253
- Márquez, R. (2006). El diseño de índices sintéticos a partir de datos secundarios: Metodologías y estrategias para el análisis social. Manuel Canales (coordinador), *Metodologías de la investigación social*, 115-140.
- Mas, J. F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., & Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249-261.
- Mas, J. F., Velázquez, A., & Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental Ciencia y política pública*, 1(1).
- Mas, J. F., Couturier, S., Paneque-Gálvez, J., Skutsch, M., Pérez-Vega, A., Castillo- Santiago, M. A., Bocco, G., (2016). Comment on Gebhardt, et al. MAD-MEX: Automatic Wall-to-Wall Land Cover Monitoring for the Mexican REDD-MRV Program Using All Landsat Data. *Remote Sens.* 2014, 6, 3923–3943. *Remote Sensing*, 8(7), 533.
- Masset, E. (2011). A review of hunger indices and methods to monitor country commitment to fighting hunger. *Food policy*, 36, S102-S108.
- Maxwell, D., & Wiebe, K. (1999). Land tenure and food security: Exploring dynamic linkages. *Development and Change*, 30(4), 825-849.
- Mbow, C., Van Noordwijk, M., Luedeling, E., Neufeldt, H., Minang, P., Kowero, G. (2014). Agroforestry solutions to address food security and climate change challenges in Africa. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 6, 61–67.
- McDonald, R., McKnight, M., Weiss, D., Selig, E., ÓConnor, M., Violin, C., Moody, A., (2005). Species compositional similarity and ecoregions: Do ecoregion boundaries represent zones of high species turnover? *Biol. Conserv.* 126, 24–40.
- Meinzen-Dick, R. S., A. Devaux, and I. Antezana. (2009). Underground Assets: Potato Biodiversity to Improve the Livelihoods of the Poor. *International Journal of Agricultural Sustainability* 7(4):235–248.

- Mendoza-Ponce A, Galicia L, & Corona R (2017). *Cambios de usos y cobertura del suelo bajo diferentes escenarios socio-económicos y climáticos en México, en Análisis y modelación de patrones y procesos de cambio*. In: *Análisis y modelación de patrones y procesos de cambio*. Eds. Mas, J.-F., pp. 75-111 Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN 978-607-02-9687-1
- Merelli, E., Paoletti, N. & Tesei, L. (2015). *Adaptability checking in complex systems*. Science of Computer Programming <http://dx.doi.org/10.1016/j.scico.2015.03.004>
- Merem, E. C., Twumasi, Y., Wesley, J., Alsarari, M., Fageir, S., Crisler, M., ... & Nwagboso, E. (2019). Regional Assessment of the Food Security Situation in West Africa with GIS. *Food and Public Health*, 9(2), 60-77.
- Meyfroidt, P. (2018). Trade-offs between environment and livelihoods: Bridging the global land use and food security discussions. *Global food security*, 16, 9-16.
- Mijatović, D., Van Oudenhoven, F., Eyzaguirre, P., Hodgkin, T. (2013). The role of agricultural biodiversity in strengthening resilience to climate change: towards an analytical framework. *Int. J. Agric. Sustain.* 11 (2), 95–107.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press, Washington, D.C., USA.
- Mingers, J. (2000). The contribution of critical realism as an underpinning philosophy for OR/MS and systems. *Journal of the Operational Research Society* 51(11):1256-1270. <http://dx.doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601033>
- Moreno-Sanchez, R., Buxton-Torres, T., Sinbernagel, K., Moreno-Sanchez, F. (2014). Fragmentation of the forests in Mexico. *Realidad Datos y Espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*. INEGI 5, 4–17.
- Morrison, K.T.; Nelson, T.A.; Ostry, A.S. Mapping spatial variation in food consumption. *Appl. Geogr.* 2011, 31, 1262–1267.
- Mundo-Rosas, V., Vizuet-Vega, N. I., Martínez-Domínguez, J., Morales-Ruán, M., Pérez-Escamilla, R., & Shamah-Levy, T. (2018). Evolución de la inseguridad alimentaria en los hogares mexicanos: 2012-2016. *salud pública de México*, 60, 309-318.
- Muñoz-Piña, C., Guevara, A., Torres, J.M., Braña, J. (2008). Paying for the hydrological services of Mexico's forests: analysis, negotiations and results. *Ecol. Econo.* 65 (4), 725–736.
- Muradian, Roldan, and Juan Camilo Cardenas. "From market failures to collective action dilemmas: Reframing environmental governance challenges in Latin America and beyond." *Ecological Economics* (2015): 358-365.
- Myers, S. S., Smith, M. R., Guth, S., Golden, C. D., Vaitla, B., Mueller, N. D., ... & Huybers, P. (2017). Climate change and global food systems: potential impacts on food security and undernutrition. *Annual review of public health*, 38, 259-277.
- Nagendra, H. and E. Ostrom. (2014). Applying the Social-ecological System Framework to the Diagnosis of Urban Lake Commons in Bangalore, India. *Ecology and Society* 19(2):67. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06582-190267>.
- Naiken, L. (2002). FAO methodology for estimating the prevalence of undernourishment. FAO. Measurement and assessment of food deprivation and undernutrition.

Napoli, M., De Muro, P., & Mazziotta, M. (2011). Towards a food insecurity multidimensional index. Unpublished Master Thesis. Universita Deglistudi. Available at < <http://www.fao.org/fileadmin/templates/ERP/uni/FIMI.pdf>.

Naranjo-Madrigal, H., van Putten, I., & Norman-López, A. (2015). Understanding socio-ecological drivers of spatial allocation choice in a multi-species artisanal fishery: a Bayesian network modeling approach. *Marine Policy*, 62, 102-115.

Nellemann, C. (Ed.). (2009). The environmental food crisis: the environment's role in averting future food crises: a UNEP rapid response assessment. UNEP/Earthprint.

Ngoma, H., Angelsen, A., Carter, S., & Roman-Cuesta, R. M. (2018). Climate-smart agriculture. *Transforming REDD*, 175.

Núñez del Prado, A. (1994). Estadística básica para planificación. Siglo XXI editores. 13° edición.

Nussbaum, M. (2003). Capabilities as fundamental entitlements: Sen and social justice. *Feminist economics*, 9(2-3), 33-59.

Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G.V.N., Underwood, E.C., D'Amico, J.A., Itoua, I., Strand, H.E., Morrison, J.C., Loucks, C.J., Allnutt, T.F., Ricketts, T.H., Kura, Y., Lamoreux, J.F., Wettengel, W.W., Hedao, P., Kassem, K.R. (2001). Terrestrial ecoregions of the worlds: a new map of life on Earth. *Bioscience* 51, 933–938.

Olsson, L., Jerneck, A., Thoren, H., Persson, J., & O'Byrne, D. (2015). Why resilience is unappealing to social science: Theoretical and empirical investigations of the scientific use of resilience. *Science advances*, 1(4), e1400217.

Opdam, P. (2018). Exploring the role of science in sustainable landscape management. An introduction to the special issue.

Organización de las naciones unidas (2013) World Population Prospects: The 2012 Revision, United Nations Population Division

Organización de Naciones Unidas (ONU). (2015). Asamblea General, "Proyecto de documento final de la cumbre de las Naciones Unidas para la aprobación de la agenda para el desarrollo después de 2015", adoptada el 27 de septiembre de 2015.

O'Neill, R.V., Johnson, A.R. & King, A.W. (1989). A hierarchical framework for the analysis of scale. *Landscape Ecol.* 3 (3/4),193–205.

Österblom, H., B. I. Crona, C. Folke, M. Nyström, and M. Troell. (2017). Marine ecosystem science on an intertwined planet. *Ecosystems* 20(1):54-61. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-016-9998-6>

Österblom, H., A. Merrie, M. Metian, W. J. Boonstra, T. Blenckner, J. R. Watson, R. R. Rykaczewski, Y. Ota, J. L. Sarmiento, V. Christensen, M. Schlüter, S. Birnbaum, B. G. Gustafsson, C. Humborg, C.-M. Mörth, B. Müller-Karulis, M. T. Tomczak, M. Troell, and C. Folke. (2013). Modeling social- ecological scenarios in marine systems. *BioScience* 63(9):735-744. <http://dx.doi.org/10.1525/bio.2013.63.9.9>

Ostrom, E. (2005). *Understanding Institutional Diversity*. Princeton: Princeton University Press.

Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419-422.

- Ostrom, E., Chang, C., Pennington, M., & Tarko, V. (2012). The Future of the Commons-Beyond Market Failure and Government Regulation. *Institute of Economic Affairs Monographs*.
- Ostrom, E. and M. Cox. (2010). Moving Beyond Panaceas: A Multitiered Diagnostic Approach for Social-ecological Analysis. *Environmental Conservation* 37(4):451–463.
- Otterman J (1974) Baring high-albedo soils by overgrazing: A hypothesized desertification mechanism. *Science* 86:531–533
- Oyama, M. D., and C. A. Nobre. (2003). A new climate–vegetation equilibrium state for tropical South America. *Geophysical Research Letters* 30:2199. doi:10.1029/2003GL018600.
- Palomo, I., Montes, C., Martin-Lopez, B., González, J. A., Garcia-Llorente, M., Alcorlo, P., & Mora, M. R. G. (2014). Incorporating the social–ecological approach in protected areas in the Anthropocene. *BioScience*, 64(3), 181-191.
- Partelow, S. (2015). Key Steps for Operationalizing Social-ecological System Framework Research in Small-scale Fisheries: A Heuristic Conceptual Approach. *Marine Policy* 51:507–511.
- Parry, H. R., Topping, C. J., Kennedy, M. C., Boatman, N. D., & Murray, A. W. (2013). A Bayesian sensitivity analysis applied to an Agent-based model of bird population response to landscape change. *Environmental Modelling & Software*, 45, 104-115.
- Pascual, U., Balvanera, P., Díaz, S., Pataki, G., Roth, E., Stenseke, M., ... & Maris, V. (2017). Valuing nature's contributions to people: the IPBES approach. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26, 7-16.
- Peláez Herreros, Ó. (2017). La marginación a lo largo del tiempo: cálculo del Índice de Marginación Absoluta (IMA) para las entidades federativas de México, 1970-2010. *Economía: teoría y práctica*, (46), 115-137.
- Peng, C.J., Lee, M.S., Wahlqvist, M.L., Pan, W.H., Lee, W.C., Lin, C., Guo, H.R. (2015). Needs-based food and nutrient security indices to monitor and modify the food supply and intakes: taiwan, 1991–2010. *Food Policy* 57, 142–152.
- Peralta, M.A.Q., Cobos, R.M.G., Delgado, F.C., (2016). Implicaciones de la disminución de la capacidad productiva de granos básicos sobre la alimentación en comunidades rurales pobres de México. *Economía agraria y recursos naturales* 16 (2), 33–67.
- Perfecto, Ivette, Vandermeer, John, Wright, Angus (2009). *Nature's Matrix: Linking Agriculture, Conservation and Food Sovereignty*. Earthscan, London, pp. 40–43.
- Pérez, J. L., Villalobos, M. A., Rosete, F., Navarro, E., Salinas, E. y Remond, R. (2013). "Procesos del cambio de la vegetación y del uso del suelo, 1976-2008". D. R. INE-SEMARNAT, México, D. F.
- Petrini, M. A., Rocha, J. V., Brown, J. C., & Bispo, R. C. (2016). Using an analytic hierarchy process approach to prioritize public policies addressing family farming in Brazil. *Land Use Policy*, 51, 85-94.
- Petrosillo, I., Aretano, R. & Zurlini, G. (2015). *Socioecological systems*. Reference Module en Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier.
- Peuquet, D. J. (1999). Time in GIS and geographical databases. *Geographical information systems*, 1, 91-103.
- Pielou EC. (1979). *Biogeography*. New York: John Wiley and Sons.
- Pinstrup-Andersen, P. (2009). Food security: definition and measurement. *Food security*, 1(1), 5-7.
- Platt, H. R. (2004). *Land use and society: geography, law and public policy*. E.U.A., Island Press.

- Poli, R., and J. Seibt, editors. (2010). *Theory and applications of ontology*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. [online] URL: <https://www.springer.com/gp/book/9789048188444>
- Popkin, B. M. (2009). *The world is fat: the fads, trends, policies, and products that are fattening the human race*. Penguin.
- Poulsen, M.N., McNab, P.R., Clayton, M.L., Neff, R.A., (2015). A systematic review of urban agriculture and food security impacts in low-income countries. *Food Policy* 55, 131–146.
- Preiser, R., and P. Cilliers. (2010). Unpacking the ethics of complexity: concluding reflections. Pages 265-287 in P. Cilliers and R. Preiser, editors. *Complexity, difference and identity*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-9187-1_13
- Preiser, R., Biggs, R., De Vos, A., & Folke, C. (2018). Social-ecological systems as complex adaptive systems: organizing principles for advancing research methods and approaches.
- Pretty, J. (2008). *Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363(1491), pp. 447–465. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163>
- Putra, A. S., Tong, G., & Pribadi, D. O. (2020). Spatial Analysis of Socio-Economic Driving Factors of Food Expenditure Variation between Provinces in Indonesia. *Sustainability*, 12(4), 1638.
- Quintero-Ángel, M. & González-Acevedo, A. (2018). Tendencias and challenges for the assessment of agricultural sustainability. *Agricultura, Ecosystem & Environment* 254, pp. 273-281.
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Ramankutty N, Foley JA, Olejniczak NJ (2002) People on the land: Changes in global population and croplands during the 20th century. *Ambio* 31(3):251–257
- Ramos Peña, E.G., Valdés Lozano, C., Cantú Martínez, P.C., Salinas García, G., González Rodríguez, L.G., Berrón Castañón, L.N., (2007). Índice de marginación y el patrón de consumo alimentario familiar de Nuevo León. *Papeles de población* 13 (54), 265–285.
- Reardon, T., Vosti, S.A. (1995). Links between rural poverty and the environment in developing countries: asset categories and investment poverty. *World Dev.* 23 (9), 1495–1506.
- Rebaudo, F., & Dangles, O. (2013). An agent-based modeling framework for integrated pest management dissemination programs. *Environmental modelling & software*, 45, 141-149.
- Rescia, A. J., & Ortega, M. (2018). Quantitative evaluation of the spatial resilience to the *B. oleae* pest in olive grove socio-ecological landscapes at different scales. *Ecological Indicators*, 84, 820-827.
- Reyes, C., Fraser Taylor, D. R., Martínez, E., & Caloca, F. L. (2006). Geo-cybernetics: A new avenue of research in Geomatics?. *Cartographica: The international journal for geographic information and geovisualization*, 41(1), 7-20.
- Rockström, J., Karlberg, L., Wani, S. P., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., ... & Qiang, Z. (2010). Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift. *Agricultural Water Management*, 97(4), 543-550.
- Rockström, J., Steffen, W. L., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E., ... & Nykvist, B. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*.
- Rosete-Vergés, F. A., Pérez-Damián, J. L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E. N., Salinas-Chávez, E., & Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y bosques*, 20(1), 21-35.

- Roundy, P.T., Bradshaw, M. & Brockman, B.K. (2018). *The emergence of entrepreneurial ecosystems: A complex adaptive systems approach*. Journal of Business Research 86, pp. 1-10.
- Ricketts TH, et al. (1999). Terrestrial Ecoregions of North America: A Conservation Assessment. Washington (DC): Island Press.
- Romero-Martínez, M., Shamah-Levy, T., Franco-Núñez, A., Villalpando, S., Cuevas-Nasu, L., Gutiérrez, J. P., & Rivera-Dommarco, J. Á. (2013). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2012: diseño y cobertura. salud pública de México, 55, S332-S340.
- Rosseel, Y. (2012). Lavaan: An R package for structural equation modeling and more. Version 0.5–12. Journal of statistical software, 48(2), 1-36.
- Ruel, M. T. (2003). Is dietary diversity an indicator of food security or dietary quality? A review of measurement issues and research needs. Food and Nutrition Bulletin, 24(2), 231-232.
- Rutten, M., Van Dijk, M., Van Rooij, W., & Hilderink, H. (2014). Land use dynamics, climate change, and food security in Vietnam: a global-to-local modeling approach. World Development, 59, 29-46.
- Ryan, J.G., Ludwig, J.A. & Mcalpine, C.A. (2007). *Complex adaptive landscapes (CAL): A conceptual framework of multi-functional, non-linear ecohydrological feedback systems*. Ecological Complexity 4, pp 113-127.
- Sagan C, Toon OB, Pollack JB (1979) Anthropogenic albedo changes and the Earth's climate. Science 206:1363–1368
- Sala OE, Chapin FS III, Armesto JJ, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke LF, Jackson RB, Kinzig A, Leemans R, Lodge DM, Mooney HA, Oesterheld M, Poff NL, Sykes MT, Walker BH, Walker M, Wall DH (2000) Biodiversity: Global bio- diversity scenarios for the year 2100. Science 287:1770–1774
- Samberg, L. H., Gerber, J. S., Ramankutty, N., Herrero, M., & West, P. C. (2016). Subnational distribution of average farm size and smallholder contributions to global food production. Environmental Research Letters, 11(12), 124010.
- Santos, F., Fletschner, D., Savath, V., Peterman, A., (2014). Can government-allocated land contribute to food security?: Intrahousehold analysis of West Bengal's Microplot Allocation Program. World Dev. 64, 860–872.
- Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente-Bousquets, J., & Anta, S. (2009). Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 100.
- Sarukhán, Urquiza-Haas, T., Koleff, P., Carabias, J., Dirzo, R., Ezcurra, E., Soberón, J. (2015). Strategic actions to value, conserve, and restore the natural capital of megadiversity countries: the case of Mexico. Bioscience 2, 164–173.
- Sassi, M. (2018). The history of food security: approaches and policies. In *Understanding Food Insecurity* (pp. 89-120). Springer, Cham.
- Schellnhuber, H. J. (2002). Coping with Earth system complexity and irregularity. Pages 151–159 in W. Steffen, J. Jaeger, D. J. Carson, and C. Bradshaw, editors. *Challenges of a changing Earth*. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- Schlüter, A. and R. Madrigal. (2012). The SES Framework in a Marine Setting: Methodological Lessons. *Rationality, Markets and Morals* 3:148–167.

- Schmook, B., Vance, C. (2009). Agricultural policy, market barriers, and deforestation: the case of Mexico's southern Yucatán. *World Dev.* 37 (5), 1015–1025.
- Schneider, S. (2014). La agricultura familiar en América Latina. Un nuevo análisis comparativo. *FIDA/RIMISP*.
- Schwartz, B. (2004, January). The paradox of choice: Why more is less. New York: Ecco.
- Sen, A. (1981). Ingredients of famine analysis: availability and entitlements. *The quarterly journal of economics*, 96(3), 433-464.
- Sen, A. (2000). *Desarrollo y Libertad*. España: Editorial Planeta.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SAGARPA). (2016). <http://www.gob.mx/siap/>.
- Shamah-Levy, T., Ruiz-Matus, C., Rivera-Dommarco, J., Kuri-Morales, P., Cuevas-Nasu, L., Jiménez-Corona, M. E., & Gómez-Acosta, L. M. (2017). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición de Medio Camino 2016. Resultados Nacionales. Cuernavaca, México: Instituto Nacional de Salud Pública.
- Shelembi, M. N. (2020). Commercial Farming Models, Smallholder Farmers' Choices and Sustainability in the Highlands Agro-Ecological Zone in Njombe District, Tanzania.
- SIACON (2013). Sistema de Información Agroalimentaria de consulta. (accessed December 2016).
- SIAP (2016). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA. <http://www.gob.mx/siap/>.
- Smajgl, A., & Bohensky, E. (2013). Behaviour and space in agent-based modelling: poverty patterns in East Kalimantan, Indonesia. *Environmental modelling & software*, 45, 8-14.
- Smith, P. (2013). Delivering food security without pressure on land. *Global Food Security* 2, 18–23.
- Solórzano, A. (2016). Can Social Protection Increase Resilience to Climate Change? A Case Study of Opportunities in Rural Yucatan, Mexico.
- Sombroek, W. G., & Gommers, R. E. N. E. (1996). *The climate change-agriculture conundrum*. West Sussex, Wiley.
- Soneye, A. S. (2014). Farm holdings in northern Nigeria and implication for food security: a remote sensing and Gis assessment. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 14(2).
- Soto Mora, C. (2003). La agricultura comercial de los distritos de riego en México y su impacto en el desarrollo agrícola. *Investigaciones geográficas*, (50), 173-195.
- Spalding, R. J. (1985). El Sistema Alimentario Mexicano (SAM): ascenso y decadencia. *Estudios sociológicos*, 315-349.
- Spedding, C. (2012). *An introduction to agricultural systems*. Springer Science & Business Media.
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., ... & Jonell, M. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 562(7728), 519.
- Sterman, J. (2010). *Business dynamics*. Irwin/McGraw-Hill 2000.
- Steyn, N. P., Nel, J. H., Nantel, G., Kennedy, G., & Labadarios, D. (2006). Food variety and dietary diversity scores in children: are they good indicators of dietary adequacy?. *Public health nutrition*, 9(5), 644-650.
- Stonich, S. C., & DeWalt, B. R. (2019). The political economy of agricultural growth and rural transformation in Honduras and Mexico. In *Human Systems Ecology* (pp. 202-230). Routledge.

- Struebig, M. J., Linkie, M., Deere, N. J., Martyr, D. J., Millyanawati, B., Faulkner, S. C., ... & John, F. A. S. (2018). Addressing human-tiger conflict using socio-ecological information on tolerance and risk. *Nature communications*, 9(1), 1-9.
- Sultan, B., Defrance, D., & Iizumi, T. (2019). Evidence of crop production losses in West Africa due to historical global warming in two crop models. *Scientific reports*, 9(1), 1-15.
- Sumner, J. (Ed.). (2016). *Learning, food, and sustainability: Sites for resistance and change*. Springer.
- Sun, Z., & Müller, D. (2013). A framework for modeling payments for ecosystem services with agent-based models, Bayesian belief networks and opinion dynamics models. *Environmental modelling & software*, 45, 15-28.
- Sunderland, T., Abdoulaye, R., Ahammad, R., Asaha, S., Baudron, F., Deakin, E., ... & Khatun, K. (2017). A methodological approach for assessing cross-site landscape change: Understanding socio-ecological systems. *Forest Policy and Economics*, 84, 83-91.
- Sweeney, G., Hand, M., Kaiser, M., Clark, J. K., Rogers, C., & Spees, C. (2016). The state of food mapping: Academic literature since 2008 and review of online GIS-based food mapping resources. *Journal of Planning Literature*, 31(2), 123-219.
- Swinnen, J., & Kuijpers, R. (2019). Value chain innovations for technology transfer in developing and emerging economies: Conceptual issues, typology, and policy implications. *Food Policy*, 83, 298-309.
- Tengö, M., E. S. Brondizio, T. Elmqvist, P. Malmer, and M. Spierenburg. (2014). Connecting diverse knowledge systems for enhanced ecosystem governance: the multiple evidence base approach. *Ambio* 43(5):579-591. <http://dx.doi.org/10.1007/s13280-014-0501-3>
- The Economist Intelligence Unit (2016). Global Food Security Index. [http:// foodsecurityindex.eiu.com/Index](http://foodsecurityindex.eiu.com/Index) (last Access February 2016).
- Thinkabail, P. S., Knox, J. W., Ozdogan, M., Gumma, M. K., Congalton, R. G., Wu, Z. T., ... & You, S. (2012). Assessing future risks to agricultural productivity, water resources and food security: how can remote sensing help?. *PE&RS, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(8), 773-782.
- Toader, M., & Roman, G. V. (2015). Family Farming—Examples for Rural Communities Development. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 6, 89-94.
- Tobler, W. (1987). Measuring spatial resolution. In *Proceedings of the International Workshop on Geographic Information Systems (Vol. 48)*. International Geographic Union, Commission on Geographical Information Sensing and Processing.
- Trimble SW, Crosson P (2000) Land use: U.S. soil erosion rates. Myth and reality. *Science* 289:248–250
- Tscharntke, T., Clough, Y., Wanger, T.C., Jackson, L., Motzke, I., Perfecto, I., Whitbread, A. (2012). Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biol. Conserv.* 151 (1), 53–59.
- Turner, BL II. (2009). Sustainability and forest transitions in the southern Yucatán: the land architecture approach. *Land Use Policy*, in press. doi:10.1016/j.landusepol.2009.03.006.
- Turner BL II, Clark WC, Kates RW, Richards JF, Mathews JT, Meyer WB (eds) (1990) *The Earth as transformed by human action: Global and regional changes in the biosphere over the past 300 years*. Cambridge University Press, Cambridge, 713 pp

Turner BL II, Kasperson RE, Matson PA, McCarthy JJ, Corell RW, Christensen L, Eckley N, Kasperson JX, Luers A, Martello ML, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A (2003) A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc Natl Acad Sci USA* 100(14):8074–8079

United Nations (UN). (1975). *Report of the World Food Conference, Rome 5-16 November 1974*. New York.

Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., & Huyghe, C. (2016). Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. *Agronomy for sustainable development*, 36(1), 15.

Van Wijk, M.T. (2014). Farm Household models to analyse food security 431 in a changing climate: a review. *Global Food Security* 1–18.

Varón, L. E. S. (2011). Análisis comparado de las condiciones de producción de dos asociaciones de productores de fruta del Occidente de Colombia para su participación en proyectos de comercio justo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 2(2), 77-87.

Velázquez, A., Durán, E., Ramírez, I., Mas, Jean-François, Bocco, G., Ramírez, G., Palacio, José- Luis (2003). Land use-cover change processes in highly biodiverse areas: the case of Oaxaca, Mexico. *Global Environ. Change* 13, 175–184.

Verburg, P. H., Mertz, O., Erb, K. H., Haberl, H., & Wu, W. (2013). Land system change and food security: towards multi-scale land system solutions. *Current opinion in environmental sustainability*, 5(5), 494-502.

von Bertalanffy, L. (1968). *General system theory: foundations, development, applications*. George Braziller, New York, New York, USA.

Warren, E., Hawkesworth, S., Knai, C. (2015). Investigating the association between urban agriculture and food security, dietary diversity, and nutritional status: a systematic literature review. *Food Policy* 53, 54–66.

Wei, W. W. (2006). Time series analysis. In *The Oxford Handbook of Quantitative Methods in Psychology: Vol. 2*.

WFP, OEA y OIM (2015). *Hambre sin fronteras. Los vínculos ocultos entre inseguridad alimentaria, violencia y migración en el triángulo Norte de Centroamérica. Un estudio exploratorio*. WFP. Washington, EU.

Whatmore, S. (1995). *From farming to agribusiness: the global agro-food system. Geographies of global change*. Oxford: Blackwell, 36-49.

Wilson D (1969) Forms of hierarchy: a selected bibliography. In: Whyte LL, Wilson AG, Wilson D (eds) *Hierarchical structures*. American Elsevier, New York, pp 287–314.

Willy, C., Neugebauer, E.A.M. & Gerngross, H. (2003) *The Concept of Nonlinearity in Complex Systems. An Additional Approach to Understand the Pathophysiology of Severe Trauma and Shock*. *European Journal of Trauma* 1, pp.11–22.

Woermann, M., and P. Cilliers. (2012). The ethics of complexity and the complexity of ethics. *South African Journal of Philosophy* 31(2):447-463. <http://dx.doi.org/10.1080/02580136.2012.10751787>

World Bank. (1986). *Poverty and Hunger: Issues and Options for Food Security in Developing Countries*. Washington DC.

World Bank. (2004). *World Development Indicators 2004* (No. 338.9 B213wo 2004). Washington, US: World Bank.

World Food Programme. (2009). *Emergency food security assessment handbook*. World Food Programme.

Wu, J. (2013). Hierarchy theory: An overview. En *Linking Ecology and Ethics for a Changing World: Values, Philosophy, and Action*, pp. 281-301. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7470-4_24

Yúñez, A., Cisneros, A., & Meza, P. (2013). Situando la agricultura familiar en México. Principales características y tipología. Serie Documentos de Trabajo N° 149. Grupo de Trabajo: Desarrollo con Cohesión Territorial. Programa Cohesión Territorial para el Desarrollo. Rimiso, Santiago, Chile.

Zabala, A. (2018). Land and food security. *Nature Sustainability*, 1(7), 335.

Zhou, B. B., Wu, J., & Anderies, J. M. (2019). Sustainable landscapes and landscape sustainability: A tale of two concepts. *Landscape and Urban Planning*, 189, 274-284.