

Diversidad de la producción agrícola: patrones y tendencias mundiales y del principal foco exportador de Sudamérica

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires,
Área Ciencias Agropecuarias*

Sebastián Aguiar

Licenciado en Ciencias Ambientales - Universidad de Buenos Aires - 2014

Lugar de trabajo: Instituto de Investigaciones Fisiológicas y
Ecológicas vinculadas a la Agricultura (IFEVA), CONICET, Facultad de Agronomía,
Universidad de Buenos Aires.



FAUBA

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Esteban G. Jobbágy Gampel

Ingeniero Agrónomo (UBA)

Ph. D. Biological Sciences (Duke University, EEUU)

Co-director

Lucas A. Garibaldi

Ingeniero Agrónomo (UBA)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (UBA)

Consejero de Estudios

Marcos Texeira

Licenciado en Ciencias Biológicas (UDELAR)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (UBA)

JURADO DE TESIS

JURADO

Diego O. Ferraro

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

Pedro Laterra

Licenciado en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

Walter A. Pengue

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Agroecología, Sociología y Desarrollo Rural (Universidad de Córdoba, España)

Fecha de defensa de la tesis: 12 de MARZO de 2019

Agradecimientos

Esteban por la curiosidad infinita, la generosidad, claridad y entusiasmo, desde el primer día hasta el último. A Lucas, por fortalecer puntos flojos del proyecto y aceptar sumarse una vez que ya estaba en marcha. A Marcos, por haber continuado enseñándome y ayudándome con la estadística y programación en R.

Al LART, por ser el espacio que hace años me da cobijo profesional. En particular, quiero agradecer a José y MO que crearon este espacio y a Dolores que, con amabilidad y buena onda, hace que todo funcione perfecto. Mis agradecimientos a todos los integrantes del laboratorio (presentes y pasados) por tantos almuerzos, intercambios y discusiones. También a los amigos que me ha dado el laboratorio: Cami, Gonza, Hernán, Lu y Pablito.

Al IFEVA por ser un instituto de excelencia, un faro para las ciencias agropecuarias y ambientales no solo del país, sino también del continente y del mundo. Esta tesis sin dudas es el fruto de este lugar donde la agronomía y la ecología se combinan de forma única. Un agradecimiento especial a los amigos que me ha dado el instituto durante el doctorado, en particular a Bruno, Juanfí, Lucio, Luis y Pipa quienes hicieron que el día a día del doctorado fuera mucho más divertido.

Al GEA por haberme dado la paz y tranquilidad necesaria para pensar y escribir, particularmente durante la última etapa de este proceso. Un agradecimiento especial a Juan y Baldi quienes me dieron alojamiento innumerables veces durante los cinco años.

A mi familia, por acompañarme y apoyarme siempre en el camino de la investigación. En casa siempre se respiró y discutió ciencia, arte y política, y desde chicos nos inculcaron las cosas que están detrás de ellas, como la solidaridad, la empatía, la coherencia, la reflexión, el ingenio, la curiosidad y la creatividad, y el pensamiento crítico, entre otros. Todas estas cosas hicieron del proceso de hacer un doctorado algo más ameno y de reflexión continua.

A Enrique Chaneton, cuyas clases de biodiversidad fueron el germen de muchas las ideas contenidas en la tesis. Justo un día antes de la defensa nos abandonó físicamente, pero esta tesis es una prueba de que su legado está vigente.

A Anto y Agos, por el apoyo, la compañía y el cariño durante algunas etapas de este proceso.

A la UBA, FAUBA y EPG, y en general a la educación pública, gratuita y de calidad.

Al CONICET, por haberme dado una beca para realizar el doctorado.

A la ANPCyT e IAI por los recursos económicos para costear los viajes.

A Fulbright y el Ministerio de Educación y Deporte por darme una beca para realizar una estadía en la Universidad de California, Berkeley. También a Paolo D’Odorico por la generosidad de recibirme allá y todas las discusiones interesantes.

A los docentes de los cursos de posgrado que he tomado, muchos han provisto conocimiento y herramientas fundamentales para el desarrollo de la tesis.

A los amigos del barrio que siempre son un el mejor camino para olvidarse por un rato del trabajo y la vida académica.

Seguro me olvido a alguien, de ser así, se lo haré saber.

"Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución."

Publicaciones derivadas de la tesis

Aguilar, S., Texeira, M., Garibaldi, L. A., & Jobbágy, E. G. (2020). Global changes in crop diversity: Trade rather than production enriches supply. *Global Food Security*, 26, 100385.

INDICE GENERAL

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS	XII
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT	XIV
1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL	2
1.1. Algunos desafíos actuales y futuros del sistema global agroalimentario.....	2
1.2. La diversidad del consumo, producción e intercambio global de alimentos en el contexto de la seguridad alimentaria global	3
1.3. Los determinantes biofísicos y humanos de la diversidad de la producción global de cultivos.	4
1.4. Trayectorias agropecuarias recientes en Sudamérica.....	5
1.5. Algunos aspectos reveladores que motivaron esta tesis.....	6
1.6. Objetivos, preguntas orientadoras y organización de la tesis.....	7
2. CAPÍTULO 2: CAMBIOS EN LA DIVERSIDAD DE LA PRODUCCIÓN, CONSUMO E INTERCAMBIO DE CULTIVOS A ESCALA GLOBAL DURANTE LOS ÚLTIMOS 50 AÑOS: LOS BARCOS MÁS QUE EL CAMPO DIVERSIFICAN NUESTRAS DIETAS.	10
2.1. Introducción	10
2.2. Materiales y métodos	12
2.2.1. Diseño del estudio y fuentes de datos	12
2.2.2. Índices de diversidad y análisis estadístico.....	12
2.3. Resultados	15
2.4. Discusión.....	21
2.5. Conclusiones	23
3. CAPÍTULO 3: PATRONES GEOGRÁFICOS Y DETERMINANTES DE LA DIVERSIDAD GLOBAL DE CULTIVOS	25

3.1.	Introducción	25
3.2.	Materiales y métodos	28
3.2.1.	Diseño del estudio, fuentes de datos y su procesamiento	28
3.2.2.	Análisis estadístico.....	28
3.3.	Resultados	30
3.3.1.	Patrones geográficos de la diversidad de cultivos.....	30
3.3.2.	Determinantes de la diversidad global de cultivos.....	33
3.4.	Discusión.....	35
3.5.	Conclusiones	39
4.	CAPÍTULO 4: DINÁMICA Y DISTRIBUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE GRANOS Y DE LAS EXISTENCIAS DE GANADO VACUNO EN ARGENTINA, BRASIL Y PARAGUAY (2002-2015).....	41
4.1.	Introducción	41
4.2.	Materiales y métodos	43
4.3.	Resultados	46
4.5.	Discusión.....	56
4.6.	Conclusiones	60
5.	CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN GENERAL	62
5.1.	Síntesis de los principales resultados	62
5.2.	Relevancia de los resultados y nuevos interrogantes para estudios futuros.....	63
5.2.1.	¿Qué ocurrió con la diversidad de la producción agrícola?.....	63
5.2.2.	Otras contribuciones relevantes a la luz del conocimiento previo.....	64
5.3.	Relevancia de los resultados para la toma de decisiones	67
5.4.	Consideraciones finales.....	68
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	69
	APÉNDICE I: MATERIAL SUPLEMENTARIO DEL CAPÍTULO 2	88
	APÉNDICE II: MATERIAL SUPLEMENTARIO DEL CAPÍTULO 3.....	93
	APÉNDICE III: MATERIAL SUPLEMENTARIO DEL CAPÍTULO 4	100

INDICE DE CUADROS

- Cuadro 3.1.** Hipótesis, fundamentos teóricos y determinantes putativos de la diversidad de cultivos. Se listan únicamente los 14 determinantes que fueron incluidos en el análisis de inferencia multimodelo. La lista completa de determinantes y sus fuentes de información se encuentran en el Cuadro Apéndice II.1.27
- Cuadro 3.2.** Modelos de efectos mixtos con mejor ajuste de los determinantes de la diversidad de cultivos según la región (Viejo y Nuevo Mundo). Cada columna representa un modelo o conjunto diferente de determinantes (amarillo, determinantes geográficos; rojo, determinantes biofísicos; verde, determinantes socioeconómicos; azul, determinantes de manejo, ver Cuadro 3.1). De los 255 modelos posibles, se presentan los 10 modelos con mejores ajustes para cada región, ordenados de acuerdo a su valor de AIC. El AIC es una medida del compromiso entre la bondad relativa de ajuste de un modelo dado y su complejidad (penaliza según el número de variables predictoras); cuanto más bajo sea su valor, más probable es que este modelo sea correcto. Las celdas sin sombrear indican determinantes que no fueron incluidos en un modelo en particular. M r²: coeficiente de determinación marginal (incluye solo los efectos fijos); C r²: coeficiente de determinación condicional (incluye efectos fijos y aleatorios); ΔAIC: diferencia entre el AIC de cada modelo y el del mejor modelo; w_i: ponderaciones de Akaike. Todos los modelos tienen el mismo efecto aleatorio, el país como ordenada al origen aleatoria. COS indica carbono orgánico del suelo. PBI indica producto bruto interno. Todas las variables, excepto Tractores (*), fueron determinantes a nivel de pixel. Ver Cuadro Apéndice II.1 para una descripción de los determinantes.34

INDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1.** Esquema ilustrativo de diferentes formas de analizar los patrones espaciales y temporales de la diversidad de cultivos. Se representan la composición de cultivos (colores) de 5 países hipotéticos (numerados con números romanos) en tres períodos de tiempo. A. Cambios temporales de la riqueza de cultivos a nivel de país (riqueza α). B. Cambios agregados en la riqueza de cultivos que se obtiene al analizar conjuntamente todos los países. Tanto para A como para B es posible estimar tendencias similares para la diversidad y equitatividad de cultivos. C. Cambios temporales en la similitud de la composición de cultivos según país. TRC representa la tasa de reemplazo de cultivos. TRC nulas y negativas indican que la composición de cultivos no cambió o disminuyó su similitud en el tiempo, respectivamente. D. Cambios temporales en la similitud de cultivos entre países. Cada punto se obtiene al comparar la composición de cultivos entre los cinco países en un momento determinado. Una tendencia positiva en la similitud como representa el gráfico implica un aumento en la homogeneidad de cultivos entre países. E. Cambios en la extensión geográfica de los cultivos (colores) en el tiempo. Pendientes positivas indican que el cultivo aumentó su presencia territorial en el tiempo y/o que su abundancia relativa se hizo más pareja entre países..... 13
- Figura 2.2.** Cambios de la diversidad (A), riqueza (B) y equitatividad (C) de cultivos producidos, consumidos, exportados e importados a nivel de países entre 1961 y 2013. Los puntos representan los valores para cada país y las líneas la tendencia agregada global con intervalos de confianza de 95% derivados de modelos lineales generalizados de efectos mixtos. La diversidad fue calculada como el índice de Shannon-Weaver, la riqueza como el número de cultivos y la equitatividad como el índice de Pielou. 16
- Figura 2.3.** Cambios en la diversidad de cultivos producidos estimados a través de la energía comestible (Kcal), el área cultivada (Área) y el valor económico de la producción (USD). La diversidad fue medida a través del índice de Shannon-Weaver. 16
- Figura 2.4.** Cambios en la diversidad, riqueza y equitatividad de la producción (A, B, C), exportaciones (D, E, F), importación (G, H, I) y consumo (J, K, L) de cultivos a escala global. La diversidad, riqueza y equitatividad fueron calculados como el índice de Shannon-Weaver, el número de cultivos y el índice de Pielou, respectivamente. NI indica no incluido..... 17
- Figura 2.5.** Similitud entre países en la composición de cultivos consumidos y producidos entre 1961 y 2013. A: Similitud en la composición de cultivos consumidos y producidos entre cada país y el promedio global. Cada punto corresponde a un país diferente. El incremento generalizado en la similitud entre los países y el promedio global indica una homogenización, es decir, una reducción en la diversidad entre países (beta). Las líneas solidas representan el modelo lineal para cada etapa del periodo analizado y la punteada la línea 1:1. B: Similitud entre la composición de cultivos consumidos y producidos para cada país. La línea representa la tendencia agregada con un intervalo de confianza del 95%. En ambos casos la similitud fue estimada al restarle a 1 la distancia de Bray-Curtis. 18

Figura 2.6. Ordenamiento multivariado de la composición de cultivos producidos (A) y consumidos (C) para 1961, 1987 y 2013 y su asociación con los principales 25 cultivos (C). El ordenamiento (NMDS) fue realizado utilizando la totalidad de países incluidos en el análisis, aunque por simplicidad únicamente se representan las trayectorias de aquellos 25 que presentaron mayor superficie cultivada en 2013. Las flechas indican las trayectorias de cada país, los cuales están agrupados por colores según continente. La leyenda de países está dividida en dos, una parte en el panel A y otra en el B. África: verde; Asia: azul; Europa: amarillo; América del norte: naranja; América del sur: rojo; Oceanía: violeta. Para una mejor visualización, los límites de los ejes del panel C son diferentes a los del A y B. Arr.: Arroz; Ave.: Avena; Azú: Azúcar; B&P: Banana y plátano; Bata.: Batata; Ceb.: Cebolla; Cent.: Centeno; C&M: Colza y mostaza; Gir.: Girasol; Lim.: Limón; Man.: Manzana; Mand.: Mandioca; Nar.: Naranja; Palma: Palma aceitera; Sor.: Sorgo; Tri.: Trigo. 19

Figura 2.7. Cambios temporales (1961-2013) en la extensión geográfica de los cultivos medida como el índice de Shannon-Weaver. A: Relación entre la extensión geográfica de la producción y del consumo de cultivos. Valores más altos del índice de Shannon-Weaver indican que los cultivos se consumen y/o producen en mayor cantidad de países y/o que su abundancia relativa es más equitativa entre los países donde se produce y/o consumen. Los vectores indican el cambio temporal para cultivos seleccionados. Ar: Arroz; Av.: Avena; C: Cebolla; L: Limón; M: Maíz; P: Palma aceitera; S: Soja; T: Tomate. B. Cambios temporales en la extensión geográfica de la producción y consumo de cultivos según grupos de cultivos. El valor representado es la pendiente temporal para cada grupo de cultivo derivado de un modelo lineal cuya variable respuesta es el índice de Shannon-Weaver y la variable respuesta el tiempo. 20

Figura 3.1. Distribución global de la diversidad de la producción de cultivos en el año 2000. La diversidad fue medida a través del índice de Shannon-Weaver (SW). El tamaño de los píxeles es de 0,5 grados (aproximadamente 50 km en el ecuador) y el análisis incluyó únicamente aquellos cuya superficie cultivada fue mayor o igual al 10% de su superficie total. 32

Figura 3.2. Distribución latitudinal de la diversidad, y sus componentes (riqueza y equitatividad), de plantas vasculares y cultivos. A. Número de especies de plantas vasculares. B. Riqueza (número) de cultivos. C. Cociente entre el número de cultivos (B) y de especies de plantas vasculares (A). D. Superficie agrícola estimada como el número de píxeles con agricultura e intensidad relativa (fracción de superficie cultivada respecto al total de la superficie del pixel) representada a través del tamaño del punto, es decir, los puntos más grandes indican un uso más intenso de la tierra. E: Equitatividad de cultivos estimada mediante el índice de Pielou. F. Diversidad de cultivos estimada mediante el índice de Shannon-Weaver. Para todos los gráficos, únicamente se encuentran representados los datos para aquellos píxeles que tuviesen al menos el 10% de su superficie bajo agricultura. 33

Figura 3.3. Importancia relativa (tamaño de la barra) y magnitud del efecto (color e intensidad) de los determinantes de la diversidad de cultivos para el Viejo (Izquierda) y Nuevo Mundo (Derecha). La importancia relativa de cada determinante fue calculada como la suma de los pesos del criterio de información de Akaike (AIC) de los modelos que incluyeron a dicho determinante (ver materiales y métodos). Azul y

rojo indican efectos positivos y negativos, respectivamente. La intensidad de los colores indica la magnitud del efecto relativo de cada determinante que es el resultado de promediar sus coeficientes en los modelos con mejor ajuste. Los modelos con mejor ajuste son aquellos que acumulan al menos el 95% de las ponderaciones de Akaike (wi). Las barras ralladas indican controladores no significativos ya que su intervalo de confianza incluye el cero. Todas las variables, excepto Tractores (*), fueron determinantes a nivel de pixel.35

Figura 4.1. Esquema conceptual para el análisis de la dinámica de la producción agrícola (A) y de las existencias de ganado vacuno (B) y las trayectorias productivas derivadas de su descripción conjunta (C). TCA representa tasa de cambio anual y es la forma a través de la cual se estima el cambio temporal de cada actividad (A y B) que luego se utiliza para analizar el cambio conjunto (C). En cada cuadrante se representa el significado de esa combinación de cambio agrícola y ganadero y el número de la trayectoria simple (ej. T1). Es posible agrupar a las trayectorias simples en cuatro trayectorias principales. La trayectoria principal I (incremento conjunto) incluye únicamente la trayectoria simple 1 (T1). La trayectoria principal II (incremento ganadero) incluye las trayectorias simples 2 y 5 (T1 y T5). La trayectoria principal III (retracción) incluye las trayectorias simples 3, 6 y 7 (T3, T6 y T7). La trayectoria principal IV (incremento agrícola) incluye las trayectorias simples 4 y 8 (T4 y T8). La trayectoria simple 9 no está incluida en ninguna trayectoria principal.....45

Figura 4.2. Cambios en la producción agrícola conjunta y de los tres países por separado. Los valores surgen de la descomposición aditiva de la producción, por lo cual la suma del cambio en área, rendimiento y composición es igual al cambio total.47

Figura 4.3. Cambios en la producción agrícola relativizada (Tn/ha) y de las existencias de ganado vacuno relativizadas (Cabezas de ganado vacuno/ha) entre el inicio (2002-2004) y fin (2013-2015) del período analizado. A y B: cambio de la producción agrícola al inicio y fin del período analizado, respectivamente. C y D: cambio de la producción ganadera al inicio y fin del período analizado, respectivamente. NI indica que la unidad territorial no fue incluida por no tener volúmenes significativos de producción.48

Figura 4.4. Producción y superficie administrativa acumulada para la agricultura y la ganadería en el inicio (2002-2004) y fin (2013-2015) del período analizado. En ambos casos, se acumularon sucesivamente los valores de producción y superficie de las unidades territoriales ordenados de mayor a menor de acuerdo con su producción (toneladas de granos o cabezas de ganado vacuno) relativizada por superficie administrativa.49

Figura 4.5. Trayectorias productivas resultantes de analizar conjuntamente la dinámica temporal (2002-2015) de la producción agrícola y ganadera. La leyenda del mapa indica las nueve trayectorias posibles (por ej. la trayectoria 1 tuvo lugar en aquellas unidades territoriales en las cuales aumentaron ambas actividades entre 2002-2015)50

Figura 4.6. Descripción de las trayectorias productivas simples según bioma. A: Cambio agrícola y ganadero de las unidades territoriales según biomas (colores). El cambio fue estimado a través del valor anualizado de la diferencia entre el valor final e inicial estimados ambos a partir de un modelo de regresión cúbica (ver Figura 4.1). B: Número de unidades territoriales según trayectoria y bioma. El tamaño del círculo es relativo al número de unidades territoriales y el color indica la trayectoria (mismos colores que la leyenda de la Figura 4.5). A su vez, los bloques de color gris sobre los encabezados de las filas y columnas representan la proporción de trayectoria o bioma, respectivamente.51

Figura 4.7. Análisis discriminante de las cuatro trayectorias principales. Los puntos representan las unidades territoriales, los números de los ejes el porcentaje de la variación explicada y los vectores la importancia relativa de cada una de las variables. En sentido horario, las variables son: distancia al puerto de exportación más cercano (Puerto), tasa media de deforestación anual (Defor), precipitación media anual (PPT), proporción de la superficie transformada en pastura o cultivo en el año 2000 (Trans_2000), densidad de rutas (Rutas), producto bruto interno per cápita (PBI), densidad de población (Pob), temperatura media anual (Temp), pendiente topográfica (Pend), cambio temporal en la diversidad de cultivos (Div) y tamaño medio de lote (Lote). El Cuadro Apéndice III.1 describe a las variables incluidas ...52

Figura 4.8. Cambios en la producción agrícola total y en sus componentes según trayectoria productiva simple. Las trayectorias productivas surgen de analizar conjuntamente la dinámica temporal de la agricultura y la ganadería. La trayectoria simple 1 representa un incremento conjunto de la agricultura y la ganadería. La trayectoria simple 4 representa un incremento de la agricultura y una disminución de la ganadería. La trayectoria simple 8 representa un incremento en la agricultura, mientras la ganadería no cambia. Las trayectorias simples 2, 3 y 6 representan una disminución en la agricultura combinadas con diferentes dinámicas de la ganadería. Los valores surgen de la descomposición aditiva de la producción, por lo cual la suma del cambio en área, rendimiento y composición es igual al cambio total. Para este análisis, los valores de producción de cada cultivo fueron convertidos a kilocalorías.53

Figura 4.9. Cambios en la producción debido a variaciones en (A) área sembrada, (B) rendimientos, (C) composición de cultivos. Los valores surgen de la descomposición aditiva de la producción, por lo cual la suma del cambio en área, rendimiento y composición es igual al cambio total. Para este análisis, los valores de producción de cada cultivo fueron convertidos a kilocalorías. NI indica no incluido y refiere a aquellas unidades territoriales en las cuales al inicio (2002-2004) y/o fin (2013-2015) del período analizado no había niveles relevantes de agricultura.54

Figura 4.10. Cambios en la diversidad de cultivos extensivos entre inicio (2002-2004) y fin (2013-2015) del período analizado. NI indica no incluido y refiere a aquellas unidades territoriales en las cuales al inicio (2002-2004) y/o fin (2013-2015) del período analizado no había niveles relevantes de agricultura.55

Figura 4.11. Esquema con los síndromes productivos de Argentina, Brasil para el período 2002-2015. Los síndromes productivos representan una agrupación de las trayectorias en base a conocimiento previo de la región. Los números indican la

proporción de la superficie administrativa que representó cada síndrome productivo. Los síndromes se numeran con letras desde la A a la E y en cada caso se especifica a qué trayectorias simple (ej. T1) y principal (ej. I – Incremento conjunto) se asocia. Los colores de los síndromes coinciden con las trayectorias principales de las cuales se desprenden (Figura 4.7).58

Abreviaturas y Acrónimos

AIC: Criterio de Información de Akaike

COS: Carbono Orgánico del Suelo

CV: Coeficiente de variación

ETP: Evapotranspiración

GLM: Modelo lineal generalizado

GLMM: Modelo lineal generalizado de efectos mixtos

IDH: Índice de Desarrollo Humano

NMDS: Escalamiento multidimensional no métrico

PBI: Producto bruto interno

SD: Desvío estándar

SE: Error estándar

SW: Índice de Shannon-Weaver

Wi: Ponderación de Akaike

Resumen

Diversidad de la producción agrícola: Patrones y tendencias mundiales y del principal foco exportador de Sudamérica

Cómo lograr la seguridad alimentaria en el futuro, y al mismo tiempo minimizar los efectos negativos sobre el medioambiente, se ha convertido en uno de los grandes desafíos que enfrenta actualmente la humanidad. La diversidad de la agricultura ha sido relegada de gran parte de las discusiones en torno a este desafío. El objetivo general de esta tesis fue describir los patrones y tendencias de la diversidad de la agricultura a escala mundial y de uno de los principales focos globales de exportación de alimentos (Argentina, Brasil y Paraguay). La aproximación metodológica involucró principalmente la construcción y análisis de bases de datos espaciales y temporales derivados de diferentes fuentes de información. Se encontró que la diversidad de los cultivos que se producen en el territorio (nivel país) ha cambiado poco durante los últimos 50 años, y el consumo se ha diversificado principalmente debido a un intercambio global de mayor magnitud y diversidad. La diversidad actual de cultivos no reproduce patrones biogeográficos naturales como la relación diversidad-latitud. Por el contrario, su principal patrón geográfico representa un legado histórico asociado, en primer lugar, a la ubicación de los principales centros de domesticación primaria y secundaria de los cultivos y, en segundo lugar, al intercambio asimétrico de cultivos durante la expansión colonial de Europa. En conjunto, estas contingencias históricas determinaron que el Viejo Mundo (África, Asia y Europa) sea generalmente más diverso que el Nuevo Mundo (América y Oceanía). La producción de granos creció fuertemente en Argentina, Brasil y Paraguay desde comienzos del siglo XXI. Por el contrario, la ganadería creció relativamente poco, pero experimentó una fuerte expansión sobre ecosistemas naturales. Esta expansión se debió parcialmente a un desplazamiento traccionado por el avance de la agricultura en los núcleos más productivos y con mayor historia de uso agropecuario. En conjunto, esta tesis sugiere que la diversidad de la agricultura es una dimensión fundamental de la seguridad alimentaria, cuya preservación e incremento deberían ser el objetivo de políticas nacionales e internacionales orientadas al uso del territorio.

Palabras clave: Agrobiodiversidad – Cambios en el uso de la tierra – Síndromes productivos - Agricultura – Ganadería – Argentina – Brasil – Paraguay – Dietas - Comercio internacional

Abstract

Diversity of agricultural production: Patterns and trends at the global scale and for the main export hub of South America

How to achieve food security in the future, and at the same time minimize the negative effects on the environment, has become one of the great challenges that humanity presents today. The diversity of agriculture has been relegated from much of the discussions regarding this challenge. The general objective of this thesis was to describe the patterns and trends of the diversity of agriculture at the global scale and for one of the main export hubs of the world (Argentina, Brazil and Paraguay). The methodological approach mainly involved the construction and analysis of spatial and temporal databases derived from different sources of information. The results showed that the diversity of crop production (country level) has slightly changed during the past 50 years, and that crop consumption has diversified mainly due to an increase and diversification of international trade. Currently, the diversity of produced crops does not reproduce natural biogeographical patterns such as the diversity-latitude relationship. In contrast, its main geographical pattern represents a historical legacy associated, firstly, with the location of the main centers of primary and secondary domestication of crops and, secondly, with the asymmetric exchange of crops during the colonial expansion of Europe. Together, these historical contingencies determined that the Old World (Africa, Asia and Europe) is generally more diverse than the New World (America and Oceania). Grain crop production grew strongly in Argentina, Brazil and Paraguay since the beginning of the 21st century. Conversely, livestock grew relatively little, but experienced a strong expansion over natural ecosystems. In part, this expansion was due to a displacement driven by the advance of agriculture in areas with higher productivity and with longer agricultural history. Overall, this thesis suggests that the diversity of agriculture is a fundamental dimension of food security, and its preservation and increase should be at the top of national and international policies aimed regarding land use and its social-ecological consequences.

Keywords: Agrobiodiversity – Land use change – Land use syndromes – Agriculture – Livestock – Argentina – Brazil – Paraguay – Diets – International trade

Capítulo 1

Introducción general

1. Capítulo 1: Introducción general

1.1. Algunos desafíos actuales y futuros del sistema global agroalimentario

Erradicar el hambre y la pobreza extrema, así como disminuir las pérdidas de biodiversidad, son algunas de las metas del milenio (ONU 2015). Bajo el escenario actual de crecimiento poblacional y cambio dietario, algunos trabajos sugieren que la producción de alimentos deberá incrementarse en un 70-100% para 2050 (Tilman et al. 2001, Godfray et al. 2010), lo cual podría implicar que la superficie agropecuaria debería duplicarse (Kastner 2012). La producción de alimentos y los cambios en el uso de la tierra asociados a ella son una de las principales causas de las pérdidas de biodiversidad (Sala et al. 2001, Newbold et al. 2015), de cambios en el clima (Houghton et al. 2012) y en los ciclos biogeoquímicos (Galloway y Cowling 2002, Jackson et al. 2001). A su vez, estos cambios en la biodiversidad modifican el funcionamiento de los ecosistemas (Tilman et al. 2014), lo que a su vez tiene impactos sobre la salud humana (Bernstein 2014). Esta situación, en el contexto de la globalización y la creciente escasez de tierras productivas (Lambin y Meyfroidt 2011), hace que uno de los grandes desafíos a los cuales se enfrenta la humanidad sea cómo alimentar mejor a una población creciente y con mayores ingresos económicos, con el menor impacto posible sobre el medioambiente (Foley et al. 2011, Tilman et al. 2011, Erb et al. 2016).

A escala global, gran parte de los cambios en el uso de la tierra se relacionan a modificaciones de la magnitud y composición de la matriz de cultivos que proveen alimentos y fibras y, más recientemente, energía a través de los biocombustibles (Naylor 2009, Godfray et al. 2010, Tilman et al. 2011). A su vez, estos cambios en la producción se asocian a cambios en el consumo de alimentos que surgen de la dinámica demográfica y dietaria que la población humana transita en distintos países (Kastner et al. 2012, Tilman y Clark 2014). Debido a la globalización y puntualmente a la intensificación del comercio internacional en los últimos años (D'Odorico et al. 2014), numerosos trabajos han documentado un creciente desacople espacial entre la producción y el consumo de alimentos (Fader et al. 2013). Asociado a ello, cada vez es más frecuente que las decisiones de consumo tomadas en determinadas regiones del planeta tengan efectos en sitios remotos (Meyfroidt et al. 2010).

En un mundo cada vez más interconectado, la creciente importancia del comercio internacional hace imprescindible realizar un balance de sus beneficios y perjuicios. Respecto al sistema agroalimentario, el comercio internacional juega un rol fundamental en cuanto al balance entre la oferta y demanda de alimentos de diferentes regiones del planeta. Esto se debe a que el consumo y la producción de alimentos, crecen a distintas tasas en las diferentes regiones. Por esta razón, el intercambio global de alimentos podría permitir un sistema más estable y con mayor acceso a alimentos (Godfray et al. 2010, Wood et al. 2018), pues la demanda de alimentos podría satisfacerse no solo con producción local, sino también a través de producción foránea (Fader et al. 2013, Wienzettel et al. 2013, Yu et al. 2013). En este contexto, los países de mayores ingresos y/o aquellos que presentan limitaciones biofísicas para producir los alimentos necesarios para satisfacer su demanda local, tienden a desplazar su uso de la tierra hacia países con mayor disponibilidad de tierras aptas para la producción (Yu et al. 2013). Por ejemplo, el 47% y 88% de la tierra cultivada de Brasil y Argentina, respectivamente, es utilizada para satisfacer demandas fuera de sus territorios, principalmente de China y la Unión Europea (Yu et al. 2013). Si bien algunos autores indican que el comercio podría incrementar la estabilidad del sistema global de

alimentos, otros sugieren que este ha aumentado su inestabilidad en los últimos años debido a la cantidad de países que son dependientes de las importaciones de productos de otros países (Porkka et al. 2013, Suweis et al. 2015).

Independientemente del rol del comercio internacional en cuanto a modificar el acceso global a los alimentos, sus consecuencias sociales y ambientales generan compromisos y desafíos a escala planetaria. Existen evidencias de las consecuencias del comercio internacional sobre la dinámica global del agua virtual (Dalin et al. 2012, Rulli et al. 2013), la emisión de gases de efecto invernadero (Dalin y Rodríguez-Iturbe 2016), los ciclos de nutrientes (Schipanski y Bennett 2012, Billen et al. 2014) y la biodiversidad (Chaudhary y Kastner 2016), entre otras. A su vez, estos efectos negativos del comercio internacional traen aparejados problemas distributivos, pues las consecuencias sociales y ambientales de la producción de determinados alimentos son desplazados hacia las regiones donde son producidos (Jorgenson 2006, Hornborg 1998, Erb et al. 2009). Los elevados costos ambientales del comercio internacional, junto a su efecto positivo en cuanto a mejorar el balance entre la oferta y demanda de alimentos, hacen que otro de los grandes desafíos que presenta la humanidad sea el diseño de un sistema de intercambio global más eficiente, con menor impacto ambiental y más equitativo en cuanto a la distribución de costos y beneficios.

1.2. La diversidad del consumo, producción e intercambio global de alimentos en el contexto de la seguridad alimentaria global

Actualmente, la mayor parte de las discusiones en torno a la producción, intercambio y consumo de alimentos ocurren en el marco de la seguridad alimentaria. La seguridad alimentaria comprende cuatro dimensiones (Schmidhuber & Tubiello 2007): disponibilidad, estabilidad, utilización y acceso. Históricamente, la mayoría de las estrategias para incrementar la seguridad alimentaria estuvieron orientadas principalmente a incrementar la disponibilidad de alimentos. Esto no solo relegó a las demás dimensiones a una jerarquía inferior, sino que también restringió las estrategias para lograr la seguridad alimentaria (Tiftonell et al. 2016). En este contexto, la mayoría de las estrategias están centradas en aumentar la disponibilidad de alimentos a través de achicar las brechas de rendimiento, aumentar los rendimientos potenciales, o reducir los desperdicios (Godfray et al. 2010), mientras que el acceso a los alimentos, los cambios de dietas y la diversificación de los sistemas de producción recibieron menor atención (Garibaldi et al. 2017).

La diversidad en la producción o el consumo no está considerada dentro de las dimensiones de la seguridad alimentaria; sin embargo, su relación con algunas de éstas es estrecha. Por ejemplo, en general los sistemas de producción más diversos son más estables en cuanto a su rendimiento, lo que se debe a la capacidad de los agroecosistemas diversos de adaptarse mejor a adversidades fitosanitarias, variabilidad climática y volatilidad de precios (Lin 2011, Gaudin et al. 2015, Aguilar et al. 2015). También, en algunos sistemas agrícolas, existen evidencias de una relación positiva entre la diversidad y la productividad (Li et al. 2009). En cuanto al consumo, generalmente aquellas dietas con mayor variedad de tipos de alimentos ingeridos están asociadas con mayor energía y mayor y mejor ingesta de nutrientes, y por ende a mejores condiciones de salud (Kant 2004). Sin embargo, la relación entre la diversidad en el consumo y la producción es compleja (Remans et al. 2015), incluso en sistemas de producción de subsistencia en los cuales no existe intercambio, por lo cual la totalidad de lo producido es consumido localmente (Jones et al. 2014).

Recientemente, un estudio global analizó el consumo aparente de cultivos y encontró una tendencia a que los países diversifiquen sus dietas (Khoury et al. 2014). Sin embargo, esta diversificación a nivel de país implicó una mayor homogenización a escala global, puesto que las dietas de los países tendieron a ser más similares durante los últimos 50 años (Khoury et al. 2014). Este estándar global de alimentación está asociado a cambios socioeconómicos y culturales que atraviesan los países, generalmente agrupados bajo el concepto de transición nutricional (Drenowski and Popkin 1997, Hawkes 2006). La etapa actual de esta transición está asociada fundamentalmente a un aumento en la preferencia por alimentos densos en energía (productos de origen animal, aceites de cultivos oleaginosos y azúcares procesados), los cuales reemplazan parcialmente a los cereales, legumbres y verduras (Pingali 2007, Kearney 2010, Kastner et al. 2012, Bonhommeau et al. 2013, Khoury et al. 2014, Tilman y Clark 2014).

La homogenización de las dietas entre países podría ser el resultado de una diversificación de la producción a nivel de país y/o explicado por el incremento y diversificación del intercambio global entre países. Estudios recientes sugieren que la diversificación del consumo en países de bajos ingresos estuvo asociado a una diversificación de la producción local, mientras que en países de ingresos altos fue explicado por un incremento en el comercio (Remans et al. 2014). Sin embargo, este estudio no ha descrito exhaustivamente estos patrones para todos los países y tampoco analizó si la homogenización en el consumo fue acompañada por una homogenización paralela de la producción.

La homogenización de la biota es el proceso a través del cual las invasiones y extinciones de especies incrementan la similitud en la composición de dos o más comunidades (McKinney y Lockwood 1999). Recientemente, algunos autores han sugerido que la homogenización de la biota es una de las características de la actual era geológica, conocida como el Antropoceno (Williams et al. 2015). La homogenización puede ser estudiada a diferentes escalas espaciales y temporales (McGill et al. 2015). A escala global, existen evidencias que sugieren que está ocurriendo en sistemas naturales (Dornelas et al. 2014), aunque no existe consenso respecto al cambio neto en la cantidad de especies (González et al. 2016, Vellend et al. 2017). En sistemas agrícolas, donde el humano determina la composición de especies, este proceso no ha sido descrito y cuantificado a escala global. Es decir, se desconoce si la diversidad de cultivos en los diferentes países crece o decrece, y si existe una tendencia temporal al incremento de la similitud en la composición de cultivos producidos.

1.3. Los determinantes biofísicos y humanos de la diversidad de la producción global de cultivos.

Existen numerosos estudios que analizan cómo diversos factores modifican las dietas a escala global, nacional e incluso subnacional, y cómo la globalización las está modificando profundamente (ej. Hawkes 2006, Kearney 2010). Por el contrario, los factores o determinantes de la producción global de alimentos, y sus patrones espaciales, han recibido mucha menor atención. En particular, respecto a la producción de cultivos, se ha sugerido que una de las consecuencias negativas asociadas a la Revolución Verde ha sido la disminución de la diversidad de especies cultivadas (Pingali 2017, IPES 2016, Ramankutty et al. 2018). Actualmente, la segunda etapa de la Revolución Verde y la expansión de la modernidad y la globalización tienden a reemplazar sistemas agrícolas tradicionales y diversos, por lo cual podrían esperarse

mayores pérdidas de diversidad. A su vez, tal como se indicó anteriormente, el comercio internacional que posibilita dietas más diversas tiene asociadas muchas consecuencias sociales y ambientales negativas. Por lo cual, una alternativa más sustentable para sustentar dietas diversas es promover la diversificación de la producción de cultivos a escala local y, por ende, reducir la dependencia del intercambio. Sin embargo, para promover escenarios productivos alternativos resulta fundamental describir cuáles son los patrones globales de la diversidad de cultivos y cuáles son los factores que determinan estos patrones.

Si bien actualmente la agricultura ocupa el 12% de la superficie terrestre libre de hielo (Ramankutty et al. 2008), los patrones y procesos relacionados a la diversidad de plantas cultivadas dentro de esta fracción del planeta han recibido muy poca atención (ej. Herrero et al. 2017). Se han propuesto varias hipótesis para explicar los patrones de la diversidad de cultivos y otras pueden derivarse del conocimiento acerca de estos patrones para plantas vasculares o variedades de cultivos. Sin embargo, la mayoría de estas propuestas carecen de sustento empírico, particularmente a escala global. Dado que el gradiente latitudinal de especies (incremento de la diversidad de especies de los polos al ecuador) es uno de los patrones más estudiados de la naturaleza, conocer si la diversidad de cultivos sigue este mismo patrón resulta interesante. A su vez, resulta interesante explorar cuáles son los procesos que subyacen a estos patrones geográficos.

1.4. Trayectorias agropecuarias recientes en Sudamérica

Además de la agricultura, el otro gran uso alimenticio de la tierra de nuestro planeta es el ganadero. En conjunto explican aproximadamente un tercio de la superficie terrestre libre de hielo (12% la agricultura y 22% la ganadería). Dado que a escala global la tierra disponible para expandir diferentes usos ha comenzado a ser escasa, la competencia entre usos de la tierra ha aumentado (Smith et al. 2010, Lambin y Meyfroidt 2011, Niewöhner et al. 2016). La interacción entre usos de la tierra ha sido estudiada de a pares para varios usos. Por ejemplo, se ha estudiado la relación entre agricultura y conservación (debate *land sharing* vs. *land sparing*, Kremen 2015), urbanización y conservación (Stott et al. 2015), y agricultura y urbanización (d'Amour et al. 2017). Sin embargo, la interacción entre la agricultura y la ganadería ha recibido menor atención. Esto podría deberse a que ambos usos están asociados a la producción de alimentos y, por ende, *a priori* no tienen compromisos en los servicios ecosistémicos que proveen. A su vez, gran parte de la producción de determinados cultivos (ej. soja y maíz) es utilizada para alimentar ganado (Herrero et al. 2015). Por lo tanto, la relación entre ambas actividades podría ser de sinergia más que de compromiso. A su vez, producen alimentos con diferentes niveles de eficiencia (Cassidy et al. 2013) y tienen impactos ambientales distintos (Clark y Tilman 2017). En este contexto, describir la dinámica de estas actividades es fundamental para caracterizar trayectorias de uso de la tierra o de producción (síndromes productivos), lo cual representa actualmente uno de los desafíos más grandes de las ciencias del uso de la tierra (Rounsevell et al. 2012).

Sudamérica, y en particular Argentina, Brasil y Paraguay, se encuentran en la lista de las regiones del mundo donde más alimentos se producen, de los cuales una fracción importante es destinada a la exportación; es decir, para satisfacer demandas de otros países (Suweis et al. 2015). Por esta razón, los cambios en el uso de la tierra que están atravesando actualmente se deben a cambios demográficos y de consumo, tanto locales como internacionales. Estos cambios en el uso de la tierra se manifiestan en el intenso reemplazo de ecosistemas naturales (pastizales, bosques secos y húmedos) por

cultivos anuales y pasturas para alimentar ganado que tuvieron lugar durante los últimos años (Hansen et al. 2013, Graesser et al. 2015, Vallejos et al. 2015). Dado que la frontera agropecuaria no se encuentra estabilizada y una fracción importante de la producción es destinada a la exportación, esta región resulta ideal para describir la dinámica de la agricultura y la ganadería a escala subnacional (símil departamento en Argentina). En base a ello se podrían describir trayectorias productivas que no son frecuentes en otras regiones del mundo y, potencialmente, proponer escenarios futuros que guíen a estas actividades de formas más virtuosas.

1.5. Algunos aspectos reveladores que motivaron esta tesis

Cómo lograr la seguridad alimentaria en el futuro, y al mismo tiempo minimizar los efectos negativos sobre el medioambiente, se ha convertido en uno de los grandes desafíos que presenta actualmente la humanidad (Foley et al. 2011). Este desafío en un contexto de creciente escasez de tierras aptas para la producción de alimentos (Lambin et al. 2013), y de desacople espacial entre la producción y consumo de alimentos (Fader et al. 2013), implica que los beneficios y perjuicios de los futuros cambios en el uso de la tierra no serán equitativos. Por lo cual, este desafío es complejo y requiere ser abordado desde múltiples perspectivas. El presente trabajo propone abordar parte de esta complejidad desde el análisis de la diversidad de la producción agrícola a diferentes escalas espaciales.

Desde hace más de 100 años, numerosos ecólogos y biogeógrafos se han dedicado a estudiar los patrones espaciales de la diversidad de especies y los procesos que los determinan. Sorprendentemente, pocos estudios han explorado estos patrones y procesos para los cultivos agrícolas. A su vez, los pocos trabajos que lo han explorado comprenden análisis exclusivamente teóricos o descripciones de patrones espaciales sin una discusión detallada respecto a los mecanismos que los determinan. Por lo cual, uno de los desafíos que esta tesis doctoral aborda es la exploración de hipótesis provenientes de teorías de distintas disciplinas para comprender los procesos que determinan la diversidad global actual de cultivos. A su vez, independientemente de este vacío científico, esta tesis busca describir los patrones y procesos de la diversidad de cultivos con la finalidad de proveer información para su mejor conservación y manejo.

Finalmente, la magnitud de los cambios recientes en el uso de la tierra en Sudamérica, junto a sus consecuencias sociales y ambientales, han alarmado a gran parte de la población de estos países. Aunque existen muchos estudios que han evaluado estos cambios en diferentes porciones del continente, pocos han explorado los cambios en más de un país o ecoregión. Por lo cual, resulta necesario describir las trayectorias de uso de la tierra de forma conjunta para identificar similitudes, diferencias y posibles escenarios futuros. Argentina, Brasil y Paraguay reúnen una serie de condiciones que hacen que esta región sea ideal para caracterizar trayectorias agropecuarias novedosas o no frecuentes en otras regiones del mundo. Éstas son: (1) es una de las principales regiones productoras de bienes agropecuarios destinados a satisfacer la demanda de otros países (Suweis et al. 2015); (2) está en la lista de los lugares del mundo donde aún quedan tierras donde expandir la producción agropecuaria (Lambin et al. 2013); (3) es una de las pocas regiones del mundo con balances negativos de nutrientes esenciales (Schipanski y Bennett 2012, de Astraloya y Pengue 2018) y de agua virtual (Dalín et al. 2012); (4) contiene elevados niveles de diversidad biológica y de almacenamiento de carbono (Myers et al. 2000, Saatchi et al. 2011); (5) posee una gran diversidad de actores sociales rurales (Killeen et al. 2008, Baldi et al. 2015), (6) aún cuenta con una elevada pobreza rural (Vakis et al. 2015), (7) recientemente se ha intensificado el

acaparamiento de tierras para la producción de *commodities* (Borrás et al. 2012) y (8) la aparente incompatibilidad de usos tradicionales de la tierra con la producción agropecuaria moderna hacen que sea una región de elevada conflictividad socio-ambiental (Reboratti 2012, Cáceres 2015).

1.6. Objetivos, preguntas orientadoras y organización de la tesis

Esta tesis se propone describir los patrones y tendencias de la diversidad de la agricultura mundial y del principal foco exportador de Sudamérica. Se analizó la agricultura en sentido amplio, es decir, no únicamente la producción de cultivos sino también de ganado. Recientemente se documentó una diversificación en las dietas a nivel de país y homogenización entre países (Khoury et al. 2014). Por lo tanto, en primer lugar, se analiza en qué medida estos cambios en las dietas fueron reflejados por dinámicas similares en la diversidad de la producción o, por el contrario, fueron independientes de la misma. En segundo lugar, se identificó un gran vacío de conocimiento en cuanto a los patrones geográficos de la diversidad de cultivos producidos a escala global. Para llenar este vacío, se describieron estos patrones geográficos y se exploraron diversos procesos o factores que podrían determinarlos. Finalmente, dado que la producción y consumo de alimentos presentan una fuerte tendencia de desacople espacial (Fader et al. 2013) con regiones del mundo que producen un gran volumen exportable para abastecer a otras que se comportan como fuertes importadores netos (Suweis et al. 2013), se exploró la dinámica temporal de la agricultura y de la ganadería a escala subnacional en el principal foco global de exportación de alimentos del continente sudamericano, que incluye a Brasil, Argentina y Paraguay. La aproximación metodológica involucró principalmente la construcción y análisis de bases de datos espaciales y temporales derivados de diferentes fuentes de acceso público.

El **capítulo 2** describe las tendencias espaciales y temporales en la riqueza, abundancia y composición de cultivos producidos, consumidos, importados y exportados a escala global durante los últimos 50 años (1961-2013). Para ello se analizaron datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) para 141 países y 47 cultivos. Las preguntas que orientan este capítulo son: 1-¿En qué medida el aumento en la diversidad del consumo de cultivos a nivel de país y la homogeneización entre países fue acompañado por una diversificación y homogenización paralela en la producción o por una diversificación y crecimiento del intercambio global de cultivos?, y 2- ¿Cuáles fueron los cambios en la distribución geográfica de los cultivos producidos y consumidos asociados con los patrones espaciales y temporales descriptos en la pregunta anterior?

El **capítulo 3** describe los patrones geográficos de la diversidad de cultivos a escala global y explora cuáles son los factores biofísicos y humanos que los determinan. Las preguntas que guiaron este estudio son: 1- ¿La diversidad de cultivos sigue el patrón latitudinal (aumento de la diversidad desde los polos hacia el ecuador) al igual que las plantas vasculares silvestres? 2- ¿Cuáles son los factores biofísicos y humanos que determinan la distribución geográfica de la diversidad de cultivos?

El **capítulo 4** describe los cambios temporales (2002-2015) en la magnitud, composición y distribución de la producción agrícola y ganadera en una de las regiones de mayor expansión productiva del planeta, representada por Argentina, Brasil y Paraguay y explorada a la escala subnacional. Se analizó la dinámica conjunta de ambas actividades y se las caracterizó bajo el concepto de trayectorias productivas (por ej.

incremento conjunto, incremento de una actividad y retracción de la otra, etc.). Se analizó la asociación de estas trayectorias productivas con diversas variables biofísicas (ej. precipitaciones, pendiente topográfica) y humanas (ej. historia de uso, distancia a puertos). Luego se determinó, a través de un análisis de descomposición aditiva, en qué medida estos cambios se debieron a variaciones en el área sembrada, en el rendimiento o en la composición de cultivos. Finalmente, a la luz del conocimiento actual sobre los procesos de uso de la tierra en Sudamérica, las trayectorias productivas fueron agrupadas en síndromes productivos o transiciones de uso de la tierra.

El **capítulo 5** presenta una síntesis de los principales resultados de cada capítulo y se discuten sus aportes novedosos, por un lado, a la luz del conocimiento actual y, por otro, en cuanto a sus implicancias para la toma de decisiones. A su vez, se plantean nuevos interrogantes que podrían guiar estudios futuros. Finalmente, se discuten las principales conclusiones en el contexto de las motivaciones que dieron origen a esta tesis.

Capítulo 2

Cambios en la diversidad de la producción, consumo e intercambio de cultivos a escala global durante los últimos 50 años: los barcos más que el campo diversifican nuestras dietas.

2. Capítulo 2: Cambios en la diversidad de la producción, consumo e intercambio de cultivos a escala global durante los últimos 50 años: los barcos más que el campo diversifican nuestras dietas.

2.1. Introducción

Desde los orígenes de la agricultura, las decisiones de los agricultores y sociedades respecto a qué cultivos sembrar y consumir ha sido moldeada por la compleja interacción entre factores culturales y naturales, tales como tradiciones, tecnología, acceso a la tierra, restricciones ambientales, entre otros (Mazoyer y Rodart 2007). Durante el último siglo, estas decisiones han sido fuertemente modificadas por el movimiento e intercambio global de personas, costumbres y bienes. Un ejemplo de ello es la fuerte homogenización en la composición de cultivos entre países como resultado de una diversificación a nivel de país (Khoury et al. 2014). Esta tendencia podría deberse a una diversificación paralela de la producción a nivel de país o, alternativamente, ser el resultado del incremento y diversificación del comercio global de cultivos. Hasta donde sabemos, esto aún no ha sido explorado.

Uno de los cambios más importantes que ha tenido el sistema agroalimentario globalizado ha sido el creciente desacople espacial entre la producción y el consumo de alimentos (Fader et al. 2013). Lejos de los días en los cuales la mayoría de las personas comía lo que producía en sus granjas, el proceso de urbanización primero, seguido por la expansión masiva del comercio internacional, determinaron que actualmente la composición de cultivos consumidos en un sitio difiera ampliamente de lo que allí se produce (Fader et al. 2013). Actualmente, más de la mitad de la población mundial vive en ciudades y aproximadamente un cuarto de los cultivos producidos son comercializados internacionalmente (D'Odorico et al. 2014). Un elemento adicional de desacople entre producción y consumo ha sido el incremento sostenido en la ingesta de productos derivados de animales alimentados con granos (Bonhommeau et al. 2013). Como resultado de este escenario dietario global, actualmente la cría de ganado de diferentes especies representa la actividad humana con mayor uso de la tierra, no solo por la superficie de pasturas (un 26% de la superficie total libre de hielo según Foley et al. 2011), sino también por la importante fracción de la producción total de granos que se destina al consumo animal (entre el 41 y el 57% según Herrero et al., 2015). Como resultado de esto último, ha crecido la producción de cultivos que rara vez llegan directamente a nuestras mesas, tal como la soja o el maíz.

La homogenización de la cultura y la naturaleza son algunas de las consecuencias principales de la globalización (Pieterse 2015, Williams et al. 2015). Las dietas, situadas en la intersección de ambos dominios, se han homogenizado fuertemente entre países debido a una diversificación del consumo a nivel de país (Khoury et al. 2014). Este estándar global de alimentación está asociado a una transición nutricional, cuya etapa actual se asocia a un aumento en el consumo de alimentos energéticamente densos, como los alimentos de origen animal, los cultivos oleaginosos y los azúcares procesados, los cuales han ido reemplazando parcialmente a los cereales, las legumbres y las verduras (Drenowski y Popkin 1997, Pingali 2007, Khoury et al. 2014). Remans y colaboradores (2014), sugieren que la diversificación en el consumo de alimentos en los países con bajos ingresos estuvo asociada a una diversificación de la producción local, mientras que en aquellos países con ingresos altos la explicación más plausible es el incremento en la accesibilidad de alimentos determinada por la intensificación en el comercio internacional. Sin embargo, este

estudio no ha descrito exhaustivamente estos patrones para todos los países y tampoco analizó si dicha homogenización en el consumo de alimentos fue acompañada por una homogenización paralela en la producción. En este sentido, dado que el 12% de la tierra no ocupada por desiertos o hielos se encuentra bajo uso agrícola (Foley et al. 2011), y que el comercio internacional tiene consecuencias tanto positivas (Puma et al. 2015, Wood et al. 2018) como negativas (Chaudhary and Kastner 2016, Dalin et al. 2012, Dalin and Rodríguez-Iturbe 2016), una evaluación exhaustiva de los patrones de la diversidad de la producción a nivel de país y entre países resulta fundamental.

Tal como se indicó anteriormente, múltiples combinaciones de especialización y/o diversificación en la producción e intercambio de cultivos podrían explicar la homogenización global en el consumo. Bajo la teoría de ventajas comparativas (Krugman & Obstfeld, 2009, Nelson et al. 2016), es decir, un escenario de fuerte intercambio global e incentivo a la economía de mercado, se esperaría que la homogenización del consumo sea explicada por una especialización de la producción a nivel de país y, por ende, a una mayor diferenciación entre países. Sin embargo, otros factores económicos y culturales podrían determinar el escenario opuesto en el cual la producción de alimentos se diversifica a nivel de país, lo cual llevaría muy probablemente a una homogenización de las dietas entre países. Entre estos factores se encuentran las barreras y restricciones al comercio internacional, los elevados costos de transporte, la preferencia por alimentos locales y la expansión de los nichos ecológicos de los cultivos derivada del mejoramiento genético que permite producirlos en lugares donde previamente no era posible. Análisis recientes sugieren que la diversidad de la producción de cultivos a escala de país no cambió significativamente entre 1992 y 2010 (Nelson et al. 2016). Esto indica que quizás los dos escenarios descriptos coexisten. Sin embargo, para responder a esta pregunta resulta necesario un análisis más exhaustivo de los cambios en la diversidad de la producción y consumo, y acompañarlo con una descripción de los cambios en la diversidad de las exportaciones e importaciones de cultivos.

Los cambios en la diversidad de la producción, consumo e intercambio global de cultivos están asociados a cambios en su distribución geográfica. Khoury y colaboradores (2014) sugieren que los cultivos ubicuos como el maíz, el trigo y el arroz son los que tuvieron mayores incrementos en cuanto a su consumo a escala global. A su vez, varios cultivos que representan alimentos básicos en muchos países del Sur Global, tal como el mijo, el sorgo y la yuca fueron algunos de los principales perdedores. A nuestro saber, aún no se ha explorado en qué medida estos cambios en la distribución geográfica del consumo de cultivos han sido acompañados por el mismo patrón en la distribución de la producción de cultivos.

El objetivo general de este capítulo es describir las tendencias espaciales y temporales de la diversidad de cultivos producidos, consumidos, importados y exportados a escala global durante los últimos 50 años (1961-2013). Para ello, analizamos datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) para 141 países y 47 cultivos. Las preguntas que guiaron este análisis fueron: 1) ¿En qué medida el aumento en la diversidad del consumo de cultivos a nivel de país y la homogeneización entre países fue acompañado por una diversificación y homogenización paralela en la producción o por una diversificación y crecimiento del intercambio global de cultivos?; y 2) ¿Cuáles fueron los cambios en la distribución geográfica de los cultivos producidos y consumidos asociados con los patrones espaciales y temporales descriptos en la pregunta anterior?

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Diseño del estudio y fuentes de datos

Los patrones espaciales y temporales de la producción, consumo e intercambio global de cultivos fueron descritos a través de información a escala nacional de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAOSTAT 2018). Para comparar nuestros resultados con los de Khoury et al. (2014) seleccionamos los países y agrupamos los cultivos de forma similar. En total seleccionamos 141 países (Apéndice I), los cuales comprenden el 98% de la población mundial actual. Los países que cambiaron durante el período de estudio (por ejemplo, Rusia, Ucrania, Kazajistán) se agregaron a su país anterior (por ejemplo, URSS). Aquellos cultivos que aparecen registrados como productos diferentes (ej. maíz, maíz para forraje, maíz dulce) se agruparon en un único cultivo (ej. maíz), mientras que los cultivos poco importantes en términos de energía comestible (ej. frutillas, arándanos) se incluyeron en clases agregadas (ej. frutas varias). Este agrupamiento permite reducir el sesgo en la estimación de la riqueza y la diversidad de cultivos, puesto que la calidad de los datos difiere entre países, particularmente para cultivos hortícolas y frutales. De los 51 ítems que incluyen Khoury et al. (2014), excluimos las bebidas (alcohólicas y fermentadas), los productos animales y misceláneos, limitando nuestro análisis a 47 cultivos (Apéndice I) que representaban globalmente más del 96% de la energía comestible (kilocalorías) consumida a escala global proveniente de cultivos.

Los valores de masa fueron convertidos en energía comestible (kilocalorías) utilizando los factores de conversión propuestos por la FAO (2001). Respecto al consumo de cultivos, se incluyó tanto la fracción consumida directamente por humanos como también la indirecta, es decir, la utilizada para alimentar al ganado. Dado que los países varían ampliamente en cuanto a superficie cultivada y cantidad de habitantes, los datos fueron relativizados. La producción y las exportaciones fueron relativizadas por área cultivada (per área), mientras que el consumo y las importaciones por población (per cápita). Particularmente para la producción, también se evaluaron los cambios en la diversidad en base al área cultivada (hectáreas) de los cultivos y a su valor de producción (dólares estadounidenses). En base a esta información calculamos índices de diversidad de cultivos a nivel país (símil diversidad alfa) y entre países (símil diversidad beta) según lo propuesto por McGill et al. (2015) (Figura 2.1).

2.2.2. Índices de diversidad y análisis estadístico

Para responder a la primera pregunta, analizamos las tendencias espaciales y temporales a nivel de país (diversidad alfa) y la diversidad entre países (diversidad beta) (Figura 2.1). Para evaluar la primera, calculamos la riqueza como el número de cultivos por país y año, y los índices de diversidad y equitatividad de Shannon-Weaver (SW) y Pielou, respectivamente. Los índices de diversidad de la producción, consumo, exportaciones e importaciones de cultivos fueron calculados utilizando la energía comestible de los cultivos. Es decir, la riqueza de cultivos para un país y año determinado es calculada como la suma de los cultivos que contribuyen a la energía comestible. A su vez, la abundancia relativa de cada cultivo es calculada como la fracción de la energía comestible que provee dicho cultivo respecto al total de ese país y año. En particular, para la producción de cultivos, también analizamos los cambios temporales en términos del área cosechada y el valor económico de la producción. Las tendencias temporales de la riqueza, diversidad y equitatividad a nivel de país fueron estimadas a partir de modelos lineales generalizados (GLM, Figura 2.1.A). Para el

índice SW asumimos una distribución Normal de los errores, mientras que para la riqueza y el índice Pielou usamos Poisson y Binomial, respectivamente. Para cada país cartografiamos la tendencia temporal. Para los tres índices de diversidad y para la producción, consumo, exportación e importación de cultivos estimamos su tendencia temporal agregada globalmente a través de modelos lineales generalizados de efectos mixtos (GLMM, Figura 2.1.B) con las mismas distribuciones de error descritas anteriormente. Para ello se utilizaron los paquetes lme4 y MASS de R (Bates et al. 2014, Ripley et al. 2013). Utilizamos año como efecto fijo, y país como efecto aleatorio, con pendientes aleatorias según año, para considerar la estructura de correlación temporal de los datos. Se verificaron los supuestos de los modelos estadísticos con procedimientos comunes y, en particular para los modelos de efectos mixtos, utilizamos el paquete de R DHARMA (Hartig 2017).

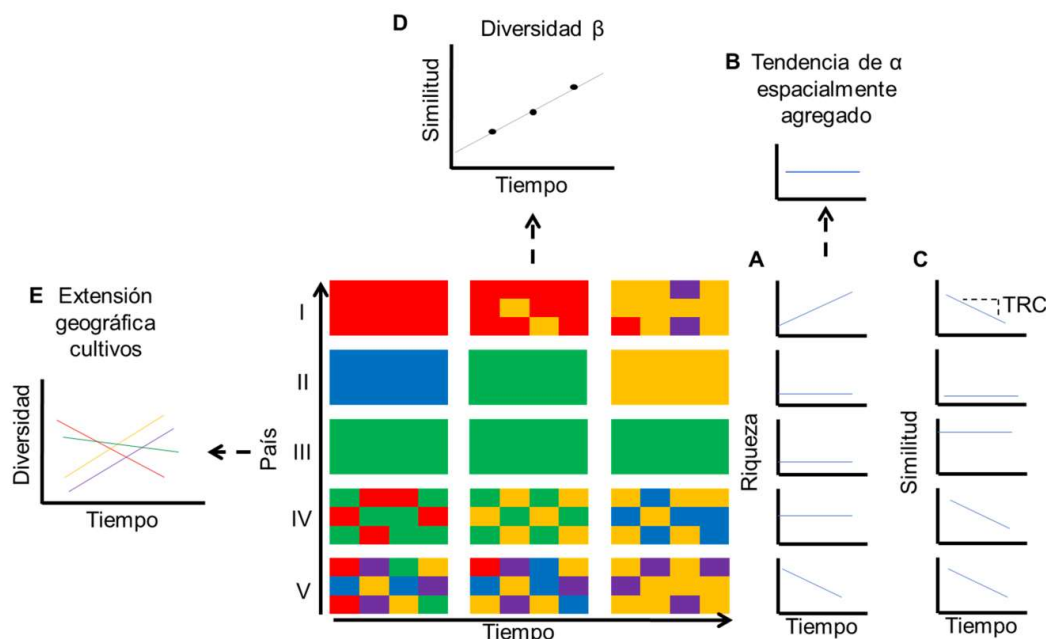


Figura 2.1. Esquema ilustrativo de diferentes formas de analizar los patrones espaciales y temporales de la diversidad de cultivos. Se representan la composición de cultivos (colores) de 5 países hipotéticos (numerados con números romanos) en tres periodos de tiempo. A. Cambios temporales de la riqueza de cultivos a nivel de país (riqueza α). B. Cambios agregados en la riqueza de cultivos que se obtiene al analizar conjuntamente todos los países. Tanto para A como para B es posible estimar tendencias similares para la diversidad y equitatividad de cultivos. C. Cambios temporales en la similitud de la composición de cultivos según país. TRC representa la tasa de reemplazo de cultivos. TRC nulas y negativas indican que la composición de cultivos no cambió o disminuyó su similitud en el tiempo, respectivamente. D. Cambios temporales en la similitud de cultivos entre países. Cada punto se obtiene al comparar la composición de cultivos entre los cinco países en un momento determinado. Una tendencia positiva en la similitud como representa el gráfico implica un aumento en la homogeneidad de cultivos entre países. E. Cambios en la extensión geográfica de los cultivos (colores) en el tiempo. Pendientes positivas indican que el cultivo aumentó su presencia territorial en el tiempo y/o que su abundancia relativa se hizo más pareja entre países.

Puesto que la diversidad de cultivos a nivel de país puede permanecer sin cambios a lo largo del tiempo aun presentando cambios en la composición de cultivos, también analizamos la tasa de reemplazo de cultivos (Figura 2.1.C). Esto permite comprender si la composición de cultivo presentó cambios direccionales a través del tiempo. Para esto, utilizamos la función *rate change* del paquete codyn de R (Hallett et al. 2016). La función calcula la similitud en la composición de cultivos a intervalos

temporales crecientes. La pendiente de la regresión lineal entre dicha similitud y los intervalos temporales permite describir la tasa y direccionalidad del cambio en la composición de cultivos. Si la pendiente de la regresión es nula, indica que la composición de cultivos no cambió en el tiempo. Por el contrario, si es positiva o negativa, indica la ocurrencia de cambios temporales en la composición de cultivos, de tipo divergente y convergente, respectivamente (Collins et al. 2000). La pendiente de la regresión lineal para cada país fue cartografiada.

La diversidad de cultivos entre países (diversidad beta) fue evaluada de tres maneras (Figura 2.1.C). El primer método consistió en comparar la composición de cultivos, tanto de la producción como del consumo, con el promedio mundial. Para cada país se comparó la composición de cultivos consumidos y producidos con el promedio global a través de la distancia de Bray-Curtis para dos períodos de tiempo (1961 y 2013). Para esto, utilizamos la función `betadisper` del paquete de R `vegan` cuyo resultado es una estimación de la disimilitud (Oksanen et al 2010). Al igual que Khoury et al. (2014), expresamos la comparación en términos de similitud al restarle a 1 la disimilitud. Un aumento generalizado en la similitud con el promedio mundial representa una reducción en la diversidad de cultivos producidos y/o consumidos entre países. Para evaluar los cambios temporales entre 1961 y 2013 de dicha similitud, utilizamos regresión lineal de Tipo II puesto que ambas variables son aleatorias. Utilizamos la similitud en el consumo y en la producción, como variable respuesta y predictora, respectivamente. Dado que la implementación de este modelo no permite incorporar factores como covariables, ajustamos un modelo de regresión lineal para cada año (1961 y 2013) por separado. El análisis fue realizado con el paquete de R `lmodel2` (Legendre y Legendre 2012, Legendre 2012).

Segundo, estimamos de forma indirecta la importancia del comercio internacional de cultivos al analizar el desacople entre la composición de cultivos producidos y consumidos de cada país. Calculamos la similitud con los mismos métodos descritos anteriormente, pero en lugar de comprar la composición de cultivos de cada país con el promedio mundial, comparamos la composición de cultivos producidos y consumidos por cada país para cada año dentro del período analizado. Analizamos la tendencia temporal agregada de este desacople a través de modelos lineales generalizados de efectos mixtos (GLMM) con el paquete `lme4` (Bates et al. 2014). Utilizamos año como efecto fijo, y país como efecto aleatorio, con pendientes aleatorias según año, para considerar la estructura de correlación temporal de los datos. Una tendencia temporal decreciente en la similitud representa un desacople, es decir, la composición de cultivos producidos y consumidos tienden a diferenciarse en el tiempo, por lo cual aumenta el rol del comercio internacional.

Finalmente, también evaluamos la homogeneización de la producción y consumo de cultivos mediante análisis multivariado (escalamiento multidimensional no métrico, NMDS) basado en la distancia de Bray-Curtis en el paquete `Vegan` en R. A través de este análisis, buscamos determinar si los países tuvieron trayectorias temporales similares en cuanto a los cultivos que producen y consumen. El NMDS se realizó para los 141 países, 47 cultivos y 53 años. Sin embargo, únicamente graficamos las trayectorias de los 25 países con mayor área cultivada en 2013 para tres años (1961, 1987, 2013). Ejecutamos 500 iteraciones, y el valor final del estrés (*stress*) fue de 0,20, lo que indica que una dimensión adicional probablemente describiría los datos con mayor precisión. Sin embargo, para una visualización más simple, decidimos trazar los resultados para dos dimensiones. Agregamos la ubicación en el plano multivariado de

los 25 cultivos más importantes con respecto a su provisión global de energía comestible. Para ello, calculamos el promedio temporal para todo el período analizado de la fracción de la energía comestible explicada por cada cultivo y ejecutamos 10000 iteraciones con la función `envfit` del paquete `Vegan` en R (Oksanen et al 2010) para determinar sus ubicaciones en el plano.

La segunda pregunta, relacionada a la expansión geográfica en la distribución de cultivos fue abordada de forma similar al análisis de los cambios en la diversidad de cultivos a nivel de país. Evaluamos los cambios en la diversidad de países en los cuales los cultivos son consumidos o producidos a través del índice SW. Índices SW altos indican que los cultivos son producidos o consumidos en muchos países y/o que su abundancia relativa se distribuye de forma equitativa entre ellos. Para cada cultivo, los cambios temporales en el índice SW fueron calculados a través de modelos de regresión simple.

2.3. Resultados

La diversidad de cultivos producidos, consumidos e intercambiados a nivel de país exhibió tendencias contrastantes durante los últimos 50 años. Mientras la diversidad de la producción de cultivos presentó muy poco cambio, promediando un índice de SW de 2,5 (es decir, en el caso hipotético en el que todos los cultivos tuvieran la misma proporción, el número efectivo de especies sería 12), la diversidad del consumo presentó un leve aumento, y la diversidad de las importaciones y exportaciones mostraron un crecimiento muy alto (Figura 2.2.A). Durante el período analizado, la diversidad del consumo fue la más alta. Alrededor de los años 90, la diversidad de lo que importaban los países superó la diversidad de lo que producían, y hacia fines del período descripto se acercó a la diversidad del consumo. A pesar de su rápido crecimiento, la diversidad agregada de lo que exportaban los países siempre fue menor a lo que importaban. Esto indica que a medida que el intercambio global se expande, las fuentes continúan siendo más especializadas que los sumideros (Figura 2.2.A). En particular, para la producción, su diversidad fue mayor cuando se la caracterizó en cuanto al área cultivada respecto al valor económico de la producción o la energía comestible (Figura 2.3). Sin embargo, la diversidad de la producción según el valor económico de la producción tuvo la mayor tasa de aumento entre estas métricas.

Los cambios descriptos anteriormente se explican en mayor medida por aumentos en la riqueza de cultivos, dado que la equitatividad de cultivos permaneció prácticamente constante en el tiempo (Figuras 2.2.B y 2.2.C). A nivel de país, la riqueza de cultivos promedió 23,3 y 26,4 para la producción al comienzo y al final del período respectivamente, mientras que para las exportaciones e importaciones aumentó de 14,3 a 27,4 y de 22 a 37,5, respectivamente. En cambio, la equitatividad se mantuvo estable en 0,55 y 0,5 para la producción y el consumo, respectivamente, lo cual indica que es aproximadamente la mitad de su máximo valor posible dado el número de cultivos incluidos en el análisis. Para los componentes del intercambio, la equitatividad creció levemente y de manera similar entre las exportaciones e importaciones, al pasar de 0,4 a 0,44, y de 0,45 a 0,5, respectivamente (Figura 2.2.C).

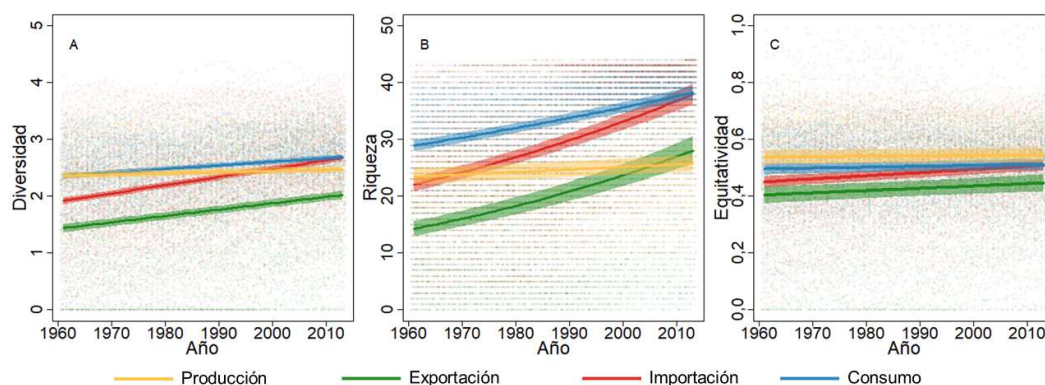


Figura 2.2. Cambios de la diversidad (A), riqueza (B) y equitatividad (C) de cultivos producidos, consumidos, exportados e importados a nivel de países entre 1961 y 2013. Los puntos representan los valores para cada país y las líneas la tendencia agregada global con intervalos de confianza de 95% derivados de modelos lineales generalizados de efectos mixtos. La diversidad fue calculada como el índice de Shannon-Weaver, la riqueza como el número de cultivos y la equitatividad como el índice de Pielou.

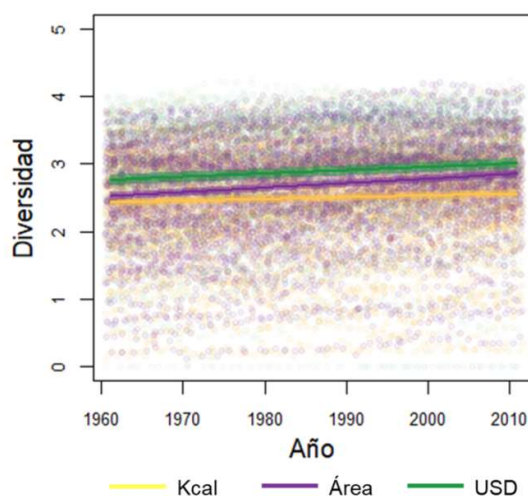


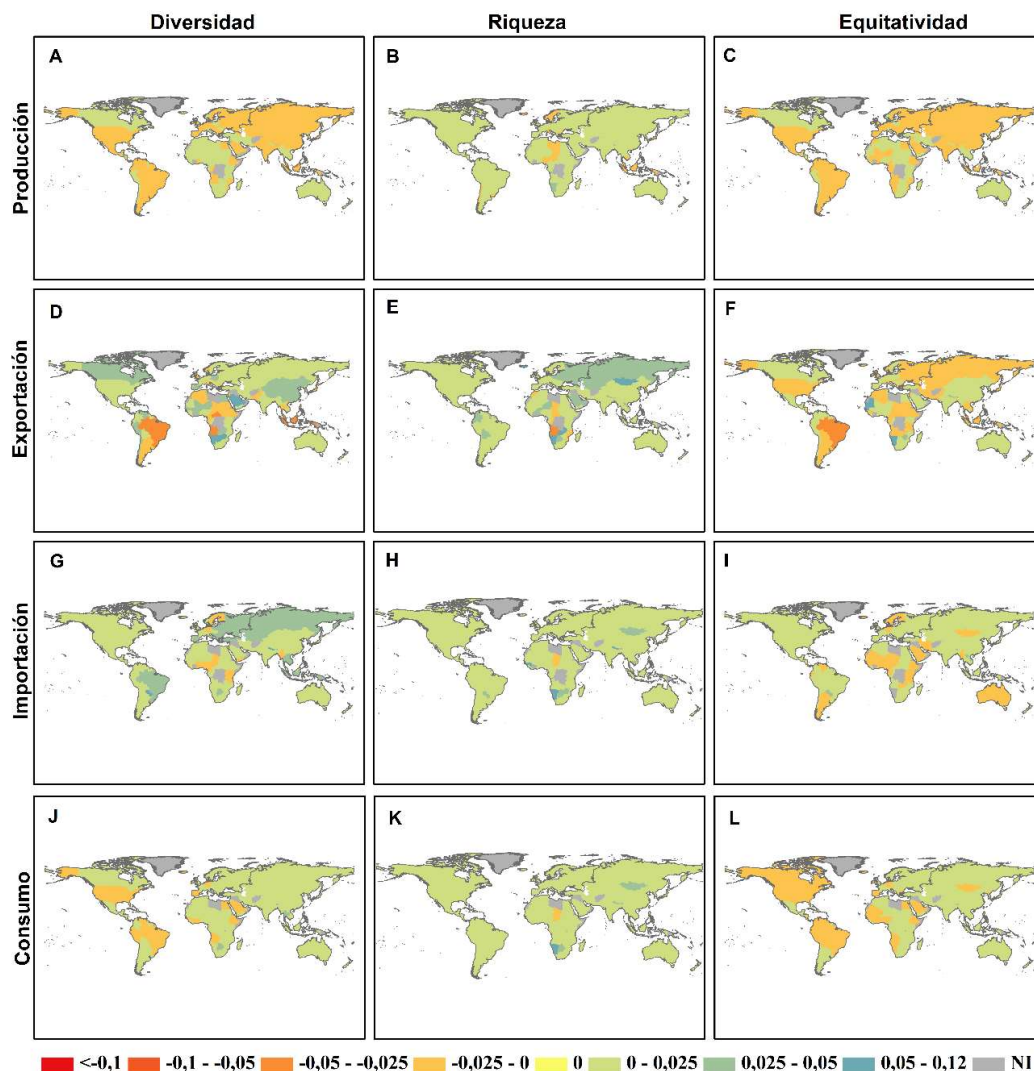
Figura 2.3. Cambios en la diversidad de cultivos producidos estimados a través de la energía comestible (Kcal), el área cultivada (Área) y el valor económico de la producción (USD). La diversidad fue medida a través del índice de Shannon-Weaver.

Es importante destacar que, a lo largo del período analizado y a escala global, la proporción promedio de las importaciones en el consumo total de cultivos y de las exportaciones en la producción total de cultivos aumentó de 0,05 a 0,12. Esto sugiere que la diversificación del consumo a nivel de país fue explicado tanto por un aumento en la magnitud del comercio internacional como por su diversificación, puesto que la diversidad de la producción a nivel de país se ha mantenido prácticamente sin cambios.

Más allá de las tendencias agregadas, existieron diferencias importantes entre los componentes del balance de cultivos y entre países, tal como preveía la dispersión de puntos de la Figura 2.2. El número de cultivos presentó un aumento generalizado para todos los componentes del balance de cultivos, aunque estas tendencias fueron contrarrestadas por tendencias mixtas en la equitatividad (Figura 2.4). Esto determinó que las tendencias espaciales de la diversidad se explicaran más por cambios en la equitatividad que en la riqueza (Figura 2.4). Los componentes del intercambio, pero en particular las exportaciones tuvieron tasas de reemplazo de cultivos más altas. Esto

indica que, durante el período analizado, los países cambiaron más la composición de los cultivos que comercializaron respecto a lo que produjeron o consumieron (Figura Apéndice I.1).

Figura 2.4. Cambios en la diversidad, riqueza y equitatividad de la producción (A, B, C), exportaciones



(D, E, F), importación (G, H, I) y consumo (J, K, L) de cultivos a escala global. La diversidad, riqueza y equitatividad fueron calculados como el índice de Shannon-Weaver, el número de cultivos y el índice de Pielou, respectivamente. NI indica no incluido

En lo que respecta a la diversidad entre países (beta), se observó que durante los últimos 50 años la similitud en la composición de cultivos de cada país respecto a la composición global ha aumentado considerablemente para el consumo y mucho menos para la producción (Figura 2.5.A). La similitud de la producción y el consumo de los países con la media global se correlacionó más al principio que al final del período de estudio ($R^2 = 0,47$ frente a $0,23$) (Figura 2.5.A), lo cual refleja el desacople entre lo que los países producen y consumen. Esto también se reflejó en la tendencia negativa de la similitud agregada entre lo que los países producen y consumen (Figura 2.5.B). Esta reducción del 15% durante los últimos 50 años implica un aumento en la importancia del intercambio de cultivos (Figura 2.5.B).

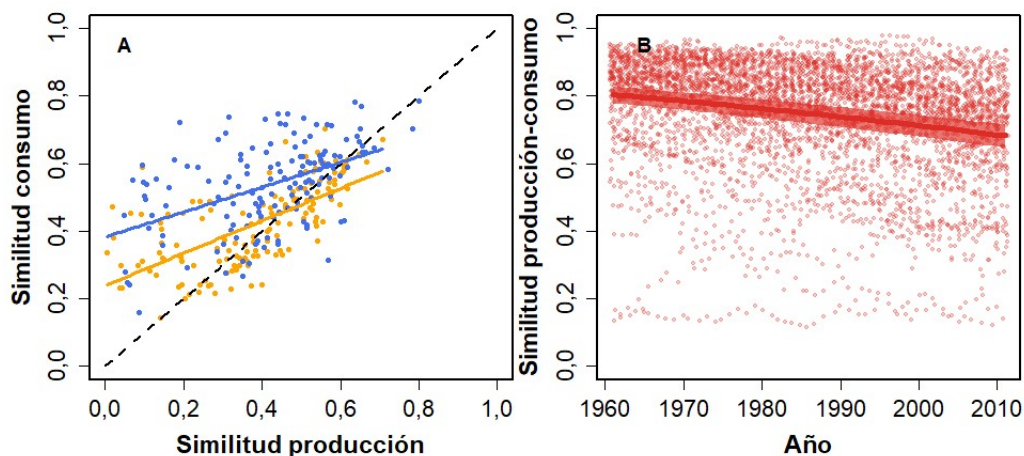


Figura 2.5. Similitud entre países en la composición de cultivos consumidos y producidos entre 1961 y 2013. A: Similitud en la composición de cultivos consumidos y producidos entre cada país y el promedio global. Cada punto corresponde a un país diferente. El incremento generalizado en la similitud entre los países y el promedio global indica una homogenización, es decir, una reducción en la diversidad entre países (beta). Las líneas solidas representan el modelo lineal para cada etapa del periodo analizado y la punteada la línea 1:1. B: Similitud entre la composición de cultivos consumidos y producidos para cada país. La línea representa la tendencia agregada con un intervalo de confianza del 95%. En ambos casos la similitud fue estimada al restarle a 1 la distancia de Bray-Curtis.

Para los 25 países con mayor área cultivada en 2013, la composición de los cultivos tanto para el consumo como para la producción tendió a converger durante los últimos 50 años (cambio centrípeto generalizado, Figura 2.6). Esto fue el resultado principalmente de la creciente participación de la soja y el maíz (Figura 2.6), los principales cultivos que asociados a la cría de ganado. El hecho de que los países ocupen posiciones similares para el consumo y la producción de cultivos (Figura 2.6.A y 2.6.B) indica que a pesar del aumento del intercambio global de cultivos (Figura 2.5.B), lo que se consume todavía está fuertemente vinculado a lo que se produce. A su vez, lo que se produce y consume, todavía está fuertemente determinado por las condiciones climáticas, tal sugiere la disposición latitudinal de los países a lo largo del primer eje multivariado. La convergencia en el consumo, y en menor medida en la producción, se explica por la fuerte incorporación, tanto en países tropicales como templados, de maíz y soja, y también por el reemplazo parcial de cultivos tradicionales (ej. sorgo, mijo y arroz) por cultivos más cosmopolitas (ej. maíz y trigo) en países asiáticos y africanos (Figura 2.6.C).

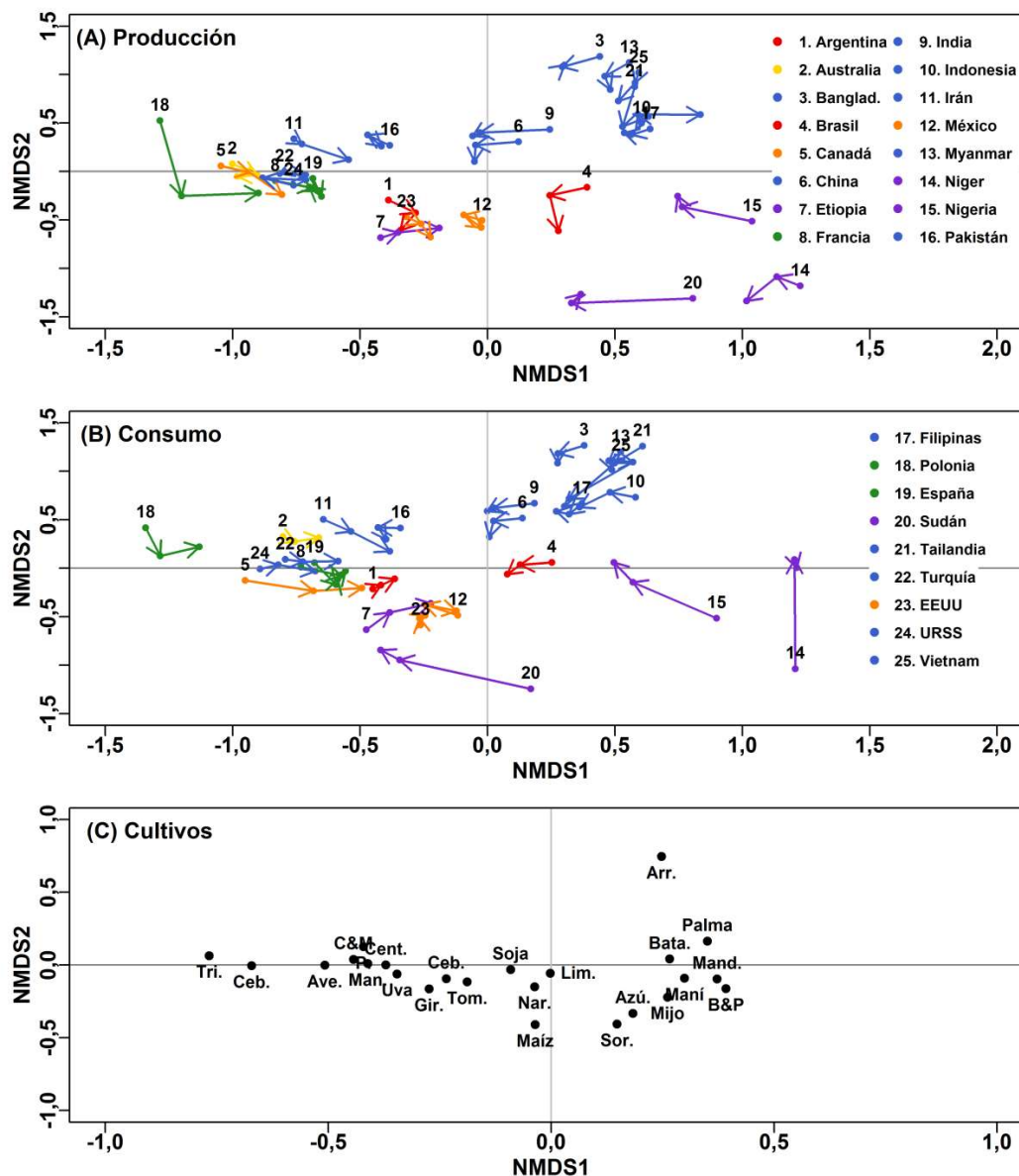


Figura 2.6. Ordenamiento multivariado de la composición de cultivos producidos (A) y consumidos (C) para 1961, 1987 y 2013 y su asociación con los principales 25 cultivos (C). El ordenamiento (NMDS) fue realizado utilizando la totalidad de países incluidos en el análisis, aunque por simplicidad únicamente se representan las trayectorias de aquellos 25 que presentaron mayor superficie cultivada en 2013. Las flechas indican las trayectorias de cada país, los cuales están agrupados por colores según continente. La leyenda de países está dividida en dos, una parte en el panel A y otra en el B. África: verde; Asia: azul; Europa: amarillo; América del norte: naranja; América del sur: rojo; Oceanía: violeta. Para una mejor visualización, los límites de los ejes del panel C son diferentes a los del A y B. Arr.: Arroz; Ave.: Avena; Azú.: Azúcar; B&P: Banana y plátano; Bata.: Batata; Ceb.: Cebolla; Cent.: Centeno; C&M: Colza y mostaza; Gir.: Girasol; Lim.: Limón; Man.: Manzana; Mand.: Mandioca; Nar.: Naranja; Palma: Palma aceitera; Sor.: Sorgo; Tri.: Trigo.

Reflejando los análisis anteriores enfocados en países, el análisis centrado en los cultivos indica que éstos son generalmente más diversos en cuanto a su extensión geográfica para el consumo que para la producción (Figura 2.7). Esto se explica por el hecho de que la mayoría de los cultivos están ubicados por encima de la línea 1:1 en la figura 2.4, por lo cual, la cantidad de países en los cuales se consumen los cultivos, o la paridad con la cual se distribuye su consumo entre los países, es mayor que para su producción. Durante los últimos 50 años, los cultivos más importantes en cuanto a su consumo y producción a nivel mundial (arroz, maíz y trigo), presentaron aumentos en la extensión geográfica de su consumo y leves cambios para su producción. Cultivos caros y relativamente lujosos, como los limones y los tomates, crecieron fuertemente, tanto en consumo como en producción (Figura 2.7.A). La soja y la palma de aceite fueron los que tuvieron la mayor expansión en consumo y, hacia fines del período analizado, se aproximaron a los valores de los cultivos más consumidos. Estos cambios fueron acompañados por distintas trayectorias en la producción para cada cultivo. Mientras que, en el caso de la soja, el aumento en la extensión geográfica del consumo fue acompañado de un proceso similar para la producción, para la palma aceitera se observó una retracción o especialización espacial de su producción. Las legumbres y los frutos secos (diversos tipos de nueces) presentaron una concentración espacial de su producción, pero mientras que las primeras no cambiaron significativamente su consumo, los frutos secos se expandieron (Figura 2.7.B). Este desacople entre crecimiento y decrecimiento del consumo y la producción indicaría que el comercio internacional estaría posibilitando una expansión geográfica del consumo sin estar acompañado por el mismo proceso en la producción. Por el contrario, las verduras, las especias y los estimulantes (ej. te, café) mostraron un crecimiento mayor en la extensión de su producción respecto a la de su consumo.

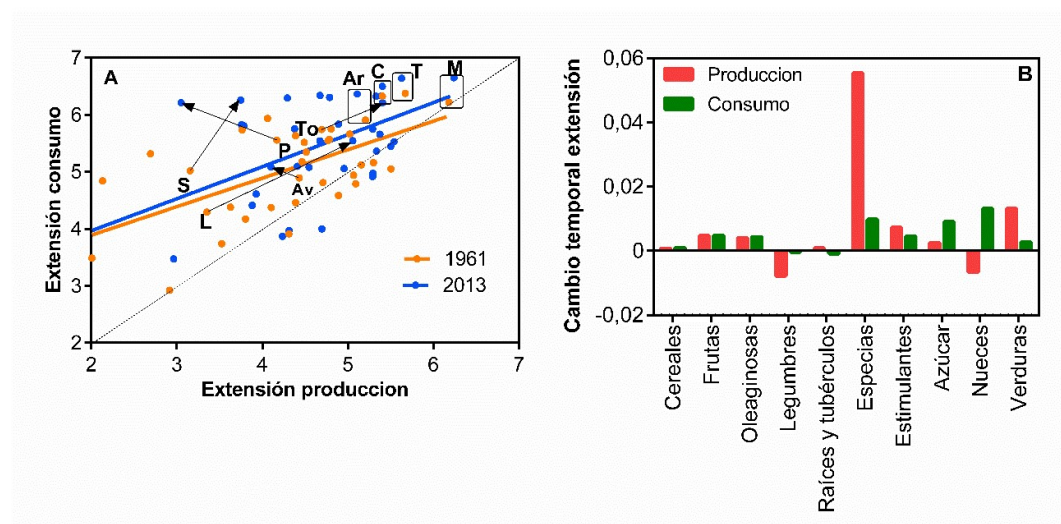


Figura 2.7. Cambios temporales (1961-2013) en la extensión geográfica de los cultivos medida como el índice de Shannon-Weaver. A: Relación entre la extensión geográfica de la producción y del consumo de cultivos. Valores más altos del índice de Shannon-Weaver indican que los cultivos se consumen y/o producen en mayor cantidad de países y/o que su abundancia relativa es más equitativa entre los países donde se produce y/o consumen. Los vectores indican el cambio temporal para cultivos seleccionados. Ar: Arroz; Av.: Avena; C: Cebolla; L: Limón; M: Maíz; P: Palma aceitera; S: Soja; T: Tomate. B. Cambios temporales en la extensión geográfica de la producción y consumo de cultivos según grupos de cultivos. El valor representado es la pendiente temporal para cada grupo de cultivo derivado de un modelo lineal cuya variable respuesta es el índice de Shannon-Weaver y la variable respuesta el tiempo.

2.4. Discusión

Durante los últimos 50 años, la diversidad del consumo de cultivos a nivel de país aumentó a una mayor tasa respecto a la de la producción. Esto estuvo explicado principalmente a la expansión y diversificación del comercio internacional. Por lo tanto, la diversificación de las dietas a escala global estuvo mayormente explicada por puertos más ocupados y diversificados que por campos agrícolas más diversos. La convergencia gradual entre países en cuanto a su composición de cultivos consumidos se debió principalmente a la diversificación de las importaciones. Sin embargo, en países con elevada área cultivada, también se observó una leve convergencia en la composición de cultivos producidos. La mayoría de los cultivos presentaron incrementos en su expansión geográfica tanto para la producción como para el consumo. Sin embargo, no todos los cultivos presentaron la misma trayectoria de cambio. Por ejemplo, mientras que la soja incrementó su expansión geográfica tanto para consumo como para producción, la palma aceitera manifestó una expansión en su consumo, pero una especialización en la producción. Si bien el comercio parece haber impulsado la expansión del consumo de muchos de los cultivos, las verduras, las especias y los estimulantes fueron una excepción. Esto podría indicar una tendencia a reemplazar la importación de estos productos, generalmente costosos en términos económicos, por su producción local.

Los resultados obtenidos sugieren que la diversificación de las dietas que tuvo lugar durante los últimos 50 años estuvo fuertemente determinada por un incremento y diversificación del comercio internacional, lo cual tiene múltiples compromisos sociales y ecológicos. En general, dietas más diversas tienen efectos positivos sobre la salud humana (Ruel 2003, Kant 2004). Sin embargo, en la mayor parte de los países en desarrollo, esta diversificación podría estar siendo impulsada por un aumento en el consumo de alimentos energéticamente densos (ej. carnes, cultivos oleaginosos, azúcares procesados) que están asociados al aumento de la obesidad y de enfermedades crónicas no-transmisibles (ej. diabetes tipo 2, enfermedades cardiovasculares y algunas formas de cáncer, Popkin 2006). A su vez, en los países desarrollados, los altos ingresos y la expansión de las cadenas de comercialización han permitido el acceso a una canasta más diversa de cultivos nutritivos provenientes de otras regiones (ej. palta, quinoa, teff, frutas tropicales, Massawe et al. 2016, Remans et al. 2014). Sin embargo, esto podría tener consecuencias negativas en las regiones donde estos cultivos son el alimento básico de la dieta, puesto que las exportaciones aumentan los precios locales (Trollo et al. 2016). A su vez, el comercio internacional tiene múltiples impactos ambientales negativos, por ejemplo, sobre la biodiversidad (Chaudhary y Kastner 2016), las emisiones de gases de efecto invernadero (Dalín y Rodríguez-Iturbe 2016) y las invasiones biológicas (Lenzen et al. 2012), entre otros. Por lo tanto, las iniciativas que busquen dirigir al sistema agroalimentario global hacia un camino más sustentable deberían incluir en su discusión tanto los beneficios asociados a dietas diversas como los perjuicios generados por la producción y comercio internacional de alimentos (Springmann et al. 2018, Wood et al. 2018).

Detrás de la tendencia global estable en la diversidad de la producción, nuestros resultados indican que, a nivel de país, coexistieron trayectorias de diversificación y especialización a nivel de país. Por un lado, Remans et al. (2014) sugieren que la mayoría de los países africanos diversificaron su producción durante los últimos 50 años. En muchos de estos países está teniendo lugar una segunda revolución verde, orientada hacia el mejoramiento de los cultivos básicos dominantes en este continente

(ej. sorgo, mijo, mandioca) lo cual podría aumentar la producción de alimentos y, por lo tanto, disminuir la inseguridad alimentaria (Alene et al. 2015). Sin embargo, algunos autores han alertado que esto podría ser acompañado de una disminución de la diversidad de cultivos, ya que los cultivos más productivos podrían desplazar a otros tradicionales (Pingali 2017). Por otro lado, varios países grandes cuya producción es orientada fuertemente a la exportación (ej. Argentina, Brasil, Estados Unidos e Indonesia) han especializado su producción hacia unos pocos cultivos, comúnmente denominados sistemas de monocultivos. Estos sistemas agrícolas tienen el beneficio de ser generalmente altamente productivos y simples, pero son más susceptibles a la volatilidad de los precios, a los brotes de plagas y, probablemente, más dependientes de agroquímicos (Garibaldi et al. 2017). Actualmente existe una fuerte presión social por aumentar la sustentabilidad de estos sistemas productivos al fomentar un menor uso de insumos agrícolas, rotación de cultivos, e incluso diversificación de los paisajes que los contienen mediante la expansión de hábitat semi-natural (Garibaldi et al. 2017).

Nuestros resultados sugieren que la teoría del comercio internacional basada en las ventajas comparativas (Krugman y Obstfeld, 2009) explicó parcialmente las tendencias en la diversidad de cultivos durante los últimos 50 años. Esta teoría predice una especialización de la producción y exportación, y una diversificación de las importaciones, cuya combinación permite que el consumo se diversifique a través del intercambio (Nelson et al. 2016). Como se indicó anteriormente, la tendencia promedio de la producción fue estable, mientras que las exportaciones e importaciones se diversificaron. Por lo tanto, la diversificación de las exportaciones y la tendencia estable en la producción no son las esperadas. Por lo tanto, otros factores adicionales, además de las ventajas comparativas en la producción, como las barreras comerciales o las preferencias de consumo por productos locales, determinan que la decisión de qué cultivos producir e intercambiar es más compleja de lo que predice la teoría económica. Se requiere mayor investigación para evaluar cuáles son los determinantes de las decisiones de consumo y producción en diferentes niveles jerárquicos (ej. campo, región, país).

Durante los últimos 50 años no se observó una homogenización en la producción de cultivos tan marcada como la que se observó para el consumo. Sin embargo, otros estudios sugieren que el 70% de los cultivos tienen un origen de domesticación distante, es decir, la mayoría son cultivados lejos de donde fueron originados (Khoury et al. 2016). Por ende, los cultivos no serían una excepción a la homogeneización biótica de nuestro planeta antropizado (Williams et al. 2016). Por lo tanto, si bien a lo largo de la historia de la agricultura la producción tendió a homogenizarse, la homogenización actual del consumo es más el resultado del comercio internacional que de la convergencia en la composición de cultivos entre los países. Sin embargo, la expansión de una agricultura fuertemente basada en insumos (ej. riego, maquinaria, agroquímicos) y, por ende, menos dependiente del ambiente, junto al mejoramiento genético de los cultivos que potencialmente permite expandir las áreas donde pueden ser cultivados, podrían permitir una mayor convergencia de la producción en el futuro. El incremento de barreras al intercambio de cultivos entre países derivados de políticas proteccionistas operaría en el mismo sentido, es decir, hacia una diversificación de la producción local y una homogenización de la producción a escala global. La construcción de escenarios futuros que tenga en cuenta todos estos factores podría ser una herramienta útil para guiar al sistema agroalimentario globalizado hacia trayectorias más virtuosas.

Con un cierto grado de desvío de la tendencia global, los 25 principales países productores de cultivos mostraron una convergencia en la composición de cultivos, tanto para la producción como para el consumo. Tanto los países tropicales como los templados aumentaron su producción y consumo de soja y maíz. En cierta medida los países templados incluyeron cultivos tropicales y subtropicales (ej. arroz, mijo y sorgo) y los países tropicales y subtropicales incluyeron cultivos de áreas templadas (ej. trigo, soja). Además, para este conjunto de países, donde las importaciones de alimentos son relativamente pequeñas (Suweis et al. 2015), la composición de los cultivos producidos y consumidos fue similar, y también a la de países cercanos. Resta explorar si este patrón de agregación espacial responde a factores biofísicos (ej. clima y suelos) o humanos (ej. cultura y economía), o la interacción de ambos.

La mayoría de los grupos de cultivos aumentaron su extensión geográfica tanto para la producción como para el consumo. Sin embargo, algunos presentaron trayectorias singulares. Los principales cereales (arroz, maíz y trigo) modificaron ligeramente su distribución tanto para la producción como para el consumo. El maíz fue el cultivo más extendido tanto para la producción como para el consumo, lo cual refleja, por un lado, la amplitud de nicho de este cultivo y, por otro, su flexibilidad de uso (ej. consumo humano directo, alimento para ganado, biocombustible e industria alimentaria, Borrás et al. 2016). Otros cultivos flexibles, como la soja y la palma de aceite, fueron de los cultivos más dinámicos, lo cual está relacionado con la expansión mundial del consumo de proteína animal (Bonhommeau et al. 2013) y de aceite vegetal (Popkin et al. 2012). Sin embargo, mientras la soja ha ampliado la extensión de su producción y consumo simultáneamente, la palma aceitera ha experimentado una concentración o especialización territorial de su producción, particularmente en el sudeste asiático. Ambos cultivos son altamente comercializados a escala global y se encuentran entre los principales impulsores de la deforestación en países tropicales y subtropicales (Henders et al. 2016). Finalmente, cultivos relativamente lujosos, como los limones y los tomates, crecieron fuertemente, tanto en consumo como en producción, lo cual podría indicar una tendencia a consumir global a consumir más frutas y verduras, y producir localmente aquellas que cultivos que se pueden producir bajo diversas condiciones ambientales o en invernáculos.

2.5. Conclusiones

A escala global, la expansión y diversificación del comercio de cultivos ha superado la diversificación de la producción de cultivos. Esto les permitió a muchas personas del mundo tener acceso a una canasta de alimentos más diversificada lo cual podría haber mejorado su calidad nutricional. La baja diversificación de la producción de cultivos durante los últimos 50 años está respaldada por tendencias mixtas a nivel de país, pues coexistieron tendencias de diversificación y especialización. A su vez, el consumo de cultivos se ha diversificado en casi todos los países gracias al comercio internacional. Por lo tanto, los beneficios en la salud humana derivados de dietas más diversas deberían ser evaluados a la luz de los múltiples compromisos sociales y ecológicos asociados al comercio internacional. Estas cuestiones deberían estar entre las prioridades de la agenda global de la sustentabilidad, la cual debería intentar equilibrar las prioridades globales y locales (ej. cambio climático, pérdida de biodiversidad, la reducción de la pobreza), especialmente en el Sur Global, donde se espera que en el futuro aumente la malnutrición y la degradación ambiental.

Capítulo 3

Patrones geográficos y determinantes de la diversidad global de cultivos

3. Capítulo 3: Patrones geográficos y determinantes de la diversidad global de cultivos

3.1.Introducción

La reducción en la diversidad de cultivos producidos ha sido una de las principales consecuencias negativas de la intensificación de la agricultura asociada a la Revolución Verde (IPES 2016, Pingali 2017, Ramankutty et al. 2018). Sin embargo, en los últimos 50 años, el consumo de cultivos se ha diversificado a nivel de país (Khoury et al. 2014). Esto estuvo más asociado con el aumento y diversificación del comercio internacional que con una diversificación de la producción a nivel de país (Capítulo 1). Actualmente, una segunda etapa de la Revolución Verde tiene lugar en áreas no alcanzadas por la primera (principalmente África y algunas regiones de Asia). Por lo tanto, el riesgo de extender la pérdida de diversidad de cultivos surge como una preocupación importante (Pingali 2017). Contrarrestando los impactos negativos del comercio internacional y la agricultura industrial altamente especializada (Balmford et al. 2018, Chaudhary y Kastner 2016, Dalin y Rodríguez-Iturbe 2016, Lenzen et al. 2012), aquellas acciones e incentivos que busquen incrementar la diversidad de los cultivos producidos a escala local surgen como pasos necesarios para sostener paisajes agrícolas y dietas más diversificadas y multifuncionales (Garibaldi et al. 2017, Mastrángelo et al. 2014).

Si bien la diversidad de la producción y/o consumo de alimentos no fue considerada inicialmente como una dimensión clave de la seguridad alimentaria (Schmidhuber y Tubiello 2007), más recientemente ha tomado mayor importancia en las agendas científicas y políticas (ej. el segundo Objetivo de Desarrollo Sostenible, IPES 2016, Zimmerer y de Haan 2017). Hasta ahora, la mayoría de los trabajos que analizan la diversidad de cultivos se han enfocado en el nivel de subespecie (ej. variedades locales, razas, parientes silvestres de los cultivos, Jarvis et al. 2008, Castañeda-Álvarez et al. 2016), mientras que el nivel de especie ha recibido menos atención. Por lo tanto, una evaluación integral que describa de forma conjunta los patrones geográficos y los determinantes de la diversidad de cultivos a este nivel resulta fundamental, tanto para la agenda científica como para la política.

A escala global, la diversidad agrícola actual es el resultado de cuatro contingencias o procesos históricos: la Revolución Neolítica, el Intercambio Colombino, la Revolución Industrial y la Revolución Verde (Mazoyer y Roudart, Hunter et al. 2017). Desde la primera de estas contingencias, los humanos han intensificado y especializado el uso del suelo, han redistribuido especies de plantas cultivadas y animales domésticos a través de la migración, colonización e intercambio (Crosby 1972, Harlan et al. 2012, D'Odorico et al. 2014, Khoury 2016), y han generado un desacople espacial creciente entre la producción y el consumo de alimentos (Fader et al. 2013). Actualmente, la segunda etapa de la Revolución Verde y la expansión de la modernidad y la globalización tienden a reemplazar sistemas agrícolas tradicionales y diversos por monocultivos con una fuerte impronta tecnológica en su mejoramiento y manejo (Brush 2004). Por lo tanto, el futuro de la diversidad de cultivos en regiones con manejo tradicional y orientados al autoconsumo, tales como varios sitios de origen de domesticación de los cultivos (conocidos como centros de origen o domesticación de Vavilov, Price y Bar-Yoseff 2011), dependen del balance entre las fuerzas contrapuestas de la cultura local, por un lado, y de las de la globalización y modernidad por otro. Además, las condiciones socio-ecológicas actuales de muchos de estos centros de

domesticación son muy diferentes de las que originaron la diversidad de cultivos y se espera que cambien en el futuro cercano como resultado de la convergencia de cambios socioeconómicos y climáticos (Zimmerer y de Haan 2017). En este contexto, la conservación de la diversidad de cultivos se vuelve prioritaria y demanda una descripción y comprensión más detallada de su distribución y de los determinantes, tanto biofísicos y humanos, que se asocian a su preservación.

El gradiente latitudinal en la diversidad de especies, es decir, el incremento de la diversidad desde los polos hacia el ecuador, es uno de los patrones más trascendentes y estudiados de la naturaleza (Kreft & Jetz 2006, Ricklefs 2004). Este patrón sería el resultado de la compleja interacción entre múltiples factores y procesos que determinan la riqueza a diferentes escalas espaciales y temporales (Ricklefs 1987). Los mismos incluyen procesos relacionados a la energía solar incidente, al balance de agua, a la heterogeneidad del ambiente, a las interacciones bióticas, al tiempo transcurrido sin disturbios intensos (ej. glaciaciones), entre otras contingencias históricas (Brown 2014). Si bien actualmente la agricultura ocupa el 12% de la superficie terrestre libre de hielo (Ramankutty et al. 2008), los patrones y procesos relacionados a la diversidad de plantas cultivadas dentro de esta fracción del planeta han recibido muy poca atención (ej. Herrero et al. 2017). Se han propuesto, de forma dispersa, numerosas hipótesis para explicar los patrones de la diversidad de cultivos y otras pueden derivarse del conocimiento acerca de estos patrones para plantas vasculares o variedades de cultivos (Cuadro 3.1), pero la mayoría de estas propuestas carecen de sustento empírico, particularmente a escala global.

El objetivo de este capítulo es describir los patrones geográficos y evaluar los determinantes putativos de la diversidad de especies cultivadas a escala global. Para ello, se utilizó una base de datos espacialmente explícita de la distribución de cultivos en todo el mundo para el año 2000 y un conjunto de 23 variables biofísicas y humanas. Por razones estadísticas se consideraron 14 de los 23 de los determinantes (ver materiales y métodos) y fueron agrupados en cuatro conjuntos caracterizados como geográficos, biofísicos, socioeconómicos y de manejo (Cuadro 1). La influencia relativa de los determinantes putativos se evaluó a partir de inferencia multimodelo, una aproximación ampliamente usada en macroecología para evaluar el soporte empírico de múltiples hipótesis alternativas, o complementarias, respecto a los factores que determinan los patrones geográficos de la naturaleza (Diniz-Filho et al. 2008).

Cuadro 3.1. Hipótesis, fundamentos teóricos y determinantes putativos de la diversidad de cultivos. Se listan únicamente los 14 determinantes que fueron incluidos en el análisis de inferencia multimodelo. La lista completa de determinantes y sus fuentes de información se encuentran en el Cuadro Apéndice II.1.

Modelo	Fundamento teórico	Determinante
Geográfico	La relación especies-área es una de las leyes fundamentales en la ecología y determina que las áreas más grandes tienden a contener un mayor número de especies (Rosenzweig 1995). Por lo tanto, podría esperarse que las regiones con mayor área agrícola alberguen una mayor diversidad de cultivos. Sin embargo, se ha sugerido que la intensificación de la agricultura (ej. varias cosechas por año) reduce la diversidad de cultivos y de variedades locales (Pingali 2017, Smale 1997).	Área
Biofísico	Además del área, la diversidad de plantas vasculares está determinada por procesos asociados al agua, la energía, las interacciones bióticas y el tiempo, cuya interacción determina el gradiente latitudinal de especies (Kreft y Jetz 2006). Se ha sugerido que la diversidad de la producción de cultivos también sigue este gradiente (Nelson et al. 2016). Sin embargo, otros sugieren que la diversidad de cultivos se mantiene en áreas marginales fuera de los trópicos donde las condiciones ambientales limitan la expansión de la agricultura industrial (Brush 2004). A su vez, la domesticación (primaria y secundaria) de muchos cultivos ocurrió en regiones áridas, estacionales (ej. mediterráneas) y montañosas donde las diferencias topográficas determinan una mayor diversidad de ambientes (Diamond 1997).	Precipitación media anual Temperatura media anual Carbono orgánico del suelo Pendiente topográfica
Socioeconómico	Pingali (2012) sugiere que la Revolución Verde tuvo éxito en regiones altamente pobladas donde, en algunos casos, los cultivos altamente productivos desplazaron los cultivos tradicionales y, por lo tanto, redujeron la diversidad de cultivos. Otros autores indican que la diversidad de cultivos, a nivel de especies y variedades, se mantiene en regiones aisladas con alta pobreza, donde la alta diversidad cultural determina que los sistemas agrícolas tradicionales no sean reemplazados por los modernos mecanizados (Brush 2004, Jarvis et al. 2008). Herrero et al. (2017) sugieren que la diversidad de cultivos está relacionada con campos de menor tamaño. Al igual que para las plantas vasculares, el tiempo podría jugar un papel importante en la determinación de la diversidad de cultivos. Harcourt (2015) sugiere que la diversidad cultural es alta en las regiones tropicales y que los lugares aislados tienen altos niveles de endemismo, pero no son necesarios más diversos. En los sistemas orientados al mercado, las teorías de Ricardo y Von Thünen sugieren que los productos con precios más altos tienden a producirse cerca de las ciudades (Meyfroidt et al. 2018). Por lo tanto, los sistemas hortícolas, de gran diversidad de cultivos, generalmente se encuentran cerca de las ciudades donde la densidad de población es alta.	Densidad de población PBI per cápita Aislamiento Tamaño de lote Cantidad de idiomas Área agrícola en 1700
Manejo	Al igual que los determinantes biofísicos que controlan la diversidad de plantas vasculares, más agua y energía podrían determinar niveles más altos de diversidad de cultivos. Sin embargo, la intensificación de la agricultura relacionada con el aumento en el uso de insumos agrícolas (riego y fertilización) y el uso de maquinaria (energía fósil), determinó una reducción en la diversidad de cultivos durante la Revolución Verde (Pingali 2017). Los nutrientes, particularmente el nitrógeno, son un factor limitante para el crecimiento de las plantas tanto en sistemas naturales como cultivados. Sin embargo, en los sistemas naturales, el aumento de nitrógeno en muchas situaciones determina una pérdida de diversidad (Bobbink et al. 2010).	Fertilización nitrogenada Riego Tractores

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Diseño del estudio, fuentes de datos y su procesamiento

Se evaluaron los patrones geográficos y los determinantes de la diversidad de cultivos producidos a escala global para el año 2000 (período más actual con datos de extensión global y grano subnacional). El análisis incluyó 119 cultivos (Apéndice II) distribuidos en 11541 píxeles de 0,5 grados (correspondiente a aproximadamente 50 km en el Ecuador) contenidos en 107 países (Apéndice II). Guiados por conocimiento previo, recopilamos 23 determinantes potenciales, de los cuales retuvimos 14 para evitar multicolinealidad. Utilizamos inferencia multimodelo para evaluar la importancia relativa de cada determinante. Este análisis estadístico fue realizado para dos regiones por separado, el Nuevo (América y Oceanía) y el Viejo (África, Asia y Europa) mundo. Esta decisión se basó en la interpretación visual de los patrones de la diversidad de cultivos y por el hecho de que varios determinantes tuvieron diferentes coeficientes (pendientes) con diferente signo dependiendo de la región (Nuevo y Viejo Mundo).

Se utilizó información acerca del área cultivada por especie proveniente del estudio de Monfreda et al. (2008). De los 176 cultivos que contiene esta base de datos, se excluyeron cultivos de fibra (ej. yute y sisal), cultivos industriales no alimentarios (ej. caucho y tabaco) y varias clases de cultivos agrupados cuya falta de especificidad imposibilita asociarlo a una única especie (ej. frutas no especificadas). Los cultivos forrajeros fueron incluidos en aquellos casos en los cuales fue posible asociarlos a una única especie (ej. alfalfa). En los casos en que el mismo cultivo apareció como varios elementos diferentes (ej. maíz y maíz para forraje), las áreas de los mismos fueron sumadas y convertidas a un único cultivo. El Apéndice II contiene la lista completa de los cultivos incluidos. La base de datos de Monfreda et al. (2008) contiene información de la superficie sembrada, del rendimiento y de la producción de cultivos a escala subnacional, derivada principalmente de censos nacionales que tuvieron lugar alrededor del año 2000. Sin embargo, algunos países no contaron con datos a escala subnacional, por lo cual fueron excluidos de este análisis. El Apéndice II contiene la lista completa de los países incluidos. Tal como sugieren los autores de la base de datos, los datos fueron agregados a un tamaño de píxel mayor. Si bien los autores sugieren escalar la información al nivel de tercer nivel administrativo (similar departamento en Argentina), esto se realizó en píxeles de 0,5 grados para poder trabajar con datos grillados y debido a que existe una elevada variabilidad en la superficie de las unidades administrativas de los distintos países. El escalado fue realizado a través de convolución cúbica. Restringimos el análisis a aquellos píxeles cuya superficie cultivada total fuera al menos el 10% de la superficie total del píxel. Sobre la base de la superficie cultivada de los 119 cultivos incluidos, se calcularon índices de diversidad para cada uno de los 11541 píxeles. Se obtuvo así la diversidad, la riqueza y la equitatividad de cultivos a través del índice de Shannon-Weaver, el número de cultivos y el índice de Pielou, respectivamente. El análisis incluyó determinantes tanto a nivel de píxel como de país. El Cuadro Apéndice II.1 describe los determinantes en cuanto a sus fuentes de información y unidades.

3.2.2. Análisis estadístico

El análisis estadístico involucró cuatro pasos con el objetivo de aumentar la robustez de las inferencias sobre las asociaciones estudiadas. En primer lugar, se exploraron exhaustivamente los patrones espaciales de la diversidad de cultivos y la

relación bivariada entre la diversidad de cultivos y cada una de las variables predictoras (determinantes). Al encontrar que el Viejo Mundo era generalmente más diverso que el Nuevo Mundo, se decidió explorar las relaciones bivariadas incluyendo la región como covariable y analizando cada región por separado. Encontramos que varios determinantes tuvieron una interacción estadística significativa con esta gran división regional y que los coeficientes (pendientes) de algunos de los determinantes eran cambiaban de signo según la región (Cuadro Apéndice II.4). En muchos casos, las interacciones entre variables resultaron difíciles de explicar, lo cual, se suma al hecho de que el método estadístico empleado para determinar la importancia relativa de las variables generalmente las excluye. Por estas razones se decidió analizar cada conjunto de datos por separado (Viejo Mundo y Nuevo Mundo). De esta manera, se ajustaron modelos estadísticos independientes para cada región. Para cada región, se analizó la asociación estadística entre los determinantes a través de matrices de correlación con la finalidad de detectar potencial multicolinealidad entre ellos (Graham 2003, Cuadro Apéndice II.2 y Cuadro Apéndice II.3). Para ambas regiones, algunos determinantes estaban correlacionados ($r > |0,7|$, Dormann et al. 2013), por lo cual se excluyeron algunos de ellos del análisis. Así, se seleccionaron 14 de los 23 determinantes, al considerar el equilibrio respecto a diferentes aspectos: (i) su relevancia dado el conocimiento previo, (ii) su facilidad de interpretación, (iii) su poder explicativo relativo derivado del análisis bivariado y (iv) su correlación con otros determinantes (Graham et al. 2003).

En segundo lugar, dada la naturaleza espacial de los datos, se ajustaron y compararon diferentes modelos de regresión múltiple para cada región que incluyeron los 14 determinantes y diferentes estructuras de autocorrelación espacial (Dormann et al. 2007, Beale et al. 2010). Analizamos la autocorrelación de los residuos de cada modelo mediante correlogramas (variación espacial del índice de Moran). Previo a todos los análisis, los determinantes (variables predictoras) fueron estandarizados. Se compararon los siguientes modelos: (1) Regresión simple ajustada mediante mínimos cuadrados ordinarios sin incluir variables predictoras (modelo nulo), (2) Regresión múltiple ajustada mediante mínimos cuadrados ordinarios incluyendo las 14 variables predictoras, (3) Regresión múltiple ajustada mediante mínimos cuadrados generalizados incluyendo las 14 variables predictoras y el modelado de la autocorrelación espacial (con diferentes estructuras de correlación), (4) Regresión múltiple de efectos mixtos incluyendo como efecto fijo las 14 variables predictoras y país como efecto aleatorio (diferente ordenada al origen según país), (5) Regresión múltiple de efectos mixtos incluyendo como efecto fijo las 14 variables predictoras y como efecto aleatorio el país (diferente ordenada al origen según país) y el modelado de la autocorrelación espacial (con diferentes estructuras de correlación). Para los modelos 3 y 5 la estructura de correlación con mejor ajuste fue la exponencial. Para ambas regiones, el modelo 4 fue superior al resto en cuanto a reducción y estabilidad del índice de Moran (Figura Apéndice II.1), por lo cual fue utilizada dicha estructura de autocorrelación espacial para el resto de los análisis.

En tercer lugar, se evaluó la importancia relativa de cada uno de los 14 determinantes para explicar la diversidad de cultivos mediante inferencia multimodelo. Este enfoque de análisis es ampliamente utilizado en macroecología para evaluar la pertinencia de múltiples hipótesis alternativas o complementarias respecto a los determinantes de patrones geográficos de la naturaleza (Diniz-Filho et al. 2008). El análisis fue llevado a cabo para cada región por separado y, para cada una de ellas, se evaluaron todas las combinaciones de modelos de efectos mixtos, considerando como

efectos fijos los 14 determinantes y como efecto aleatorio el país. No existe consenso en la literatura estadística respecto a cómo evaluar la importancia relativa de las variables (Azen et al. 2001, Johnson y LeBreton 2004), lo cual se ha amplificado por el uso creciente de inferencia multimodelo y de los enfoques de la teoría de la información (Giam y Olden 2016, Gallipaud et al. 2017, Grueber et al. al. 2011, Harrison et al. 2018, Symonds y Moussalli 2011). Por lo tanto, se evaluó la importancia relativa de las variables tanto en relación a su criticidad (la probabilidad que tiene cada determinante de ser incluido en los modelos con mejor desempeño), como en relación al tamaño del efecto (el valor del coeficiente de cada determinante en el modelo de regresión múltiple). La criticidad se estimó a partir de la suma de las ponderaciones de Akaike de los mejores modelos (modelos que acumulan el 95% de la suma de las ponderaciones de Akaike). El tamaño del efecto de cada determinante se obtuvo al promediar sus coeficientes a través del mismo conjunto de mejores modelos. Para cada determinante se estimaron los intervalos de confianza de su coeficiente, y en aquellos casos en el que el 0 estaba incluido dentro del intervalo, se consideró que el efecto del determinante era nulo.

En el cuarto y último paso, se evaluó la capacidad explicativa de los mejores modelos mediante el coeficiente de determinación (r^2) marginal y condicional (Nakagawa y Schielzeth 2013). Dado que la multicolinealidad es un problema serio en la inferencia multimodelo (Cade 2015), también se analizó su presencia mediante análisis a posteriori a través del factor de inflación de varianza (VIF). Ninguno de los mejores modelos incluyó determinantes con valores de VIF mayores a 2,5 (Zuur et al. 2009). Se analizó el cumplimiento de los supuestos de los modelos lineales de efectos mixtos para el mejor modelo de cada región. Únicamente se observó una leve falta de independencia a distancias pequeñas. Los análisis fueron realizados utilizando los siguientes paquetes de R *car*, *mumin*, *ncf*, *nlme*, *raster*, *rgdal*, *r2glmm*, *sp* y *vegan*.

3.3. Resultados

3.3.1. Patrones geográficos de la diversidad de cultivos

La diversidad de la producción de cultivos varió considerablemente a escala global y el patrón geográfico más relevante indicó una mayor diversidad en el Viejo Mundo (África, Asia y Europa, media = 2,83, $n = 8621$, SE = 0,007) respecto al Nuevo Mundo (América y Oceanía, media = 2,11 $n = 2920$, SE = 0,01) (Figuras 3.1 y 3.2). Debido a este patrón, y al hecho de que muchos de los determinantes potenciales tuvieron coeficientes con distinto signo dependiendo de la región (Viejo y Nuevo Mundo, Cuadro Apéndice II.4), los análisis para determinar la importancia relativa de estos determinantes fueron realizados para cada región independientemente. Otro contraste importante fue que el Viejo Mundo también presentó una mayor área dedicada a la agricultura que el Nuevo (Figura 3.2.D). Entre las regiones con alta diversidad en el Viejo Mundo se encontraron el Mediterráneo, el este de China, el sudoeste de la India, Indonesia y el centro-este de África (Figura 3.1). Sin embargo, algunas regiones del Viejo Mundo se diferenciaron del patrón general al exhibir bajos niveles de diversidad de cultivos, siendo ejemplos de esto el Sahel y Sudáfrica (continente africano; Figura 3.1), Kazajstán y los deltas de los ríos Ganges y Mekong (continente asiático; Figura 3.1). Por otro lado, algunas regiones del Nuevo Mundo fueron muy diversas, como por ejemplo el valle central de California, el sur de México y Guatemala, y el norte y sur de los Andes (Figura 3.1). Con excepción de las áreas mediterráneas (California y Chile),

América tuvo un leve patrón latitudinal, debido a que las áreas tropicales fueron más diversas que las templadas (Figura 3.2.F).

La riqueza y la diversidad de la producción global de cultivos no siguió el patrón latitudinal descripto para plantas vasculares silvestres (Figuras 3.2.A y 3.2.B). Si bien, tanto el Viejo como el Nuevo Mundo fueron altamente diversos cerca del ecuador, ambos también tuvieron altos niveles de diversidad en áreas templadas. Además, al analizar los patrones de la diversidad de cultivos de forma relativa respecto a la de plantas vasculares, se observó que las áreas templadas fueron más diversas que las tropicales (Figura 3.2.C). Mientras que el patrón de la diversidad de cultivos en el Viejo Mundo fue más similar al de su riqueza, en el Nuevo Mundo fue más parecido al de la equitatividad (Figuras 3.2.B, 3.2.E y 3.2.F). La diversidad y equitatividad tuvieron un leve patrón latitudinal en el Nuevo Mundo, pues las áreas tropicales tuvieron generalmente mayor diversidad y una distribución más pareja en la abundancia relativa de los cultivos. La relación relativamente más estrecha entre cultivos y plantas vasculares tuvo lugar en áreas templadas del Viejo Mundo, zona en la cual fueron domesticados el mayor número de cultivos a lo largo de la historia (Figura 3.2.C). En la actualidad esta zona es la que mayor área cultivada posee (estimada como la cantidad de píxeles), mientras que en términos relativos (fracción de superficie cultivada respecto al total de la superficie del pixel) las áreas con mayor intensidad se encontraron en áreas templadas de América del Norte y regiones tropicales del Viejo Mundo (principalmente India, Figura 3.2.D).

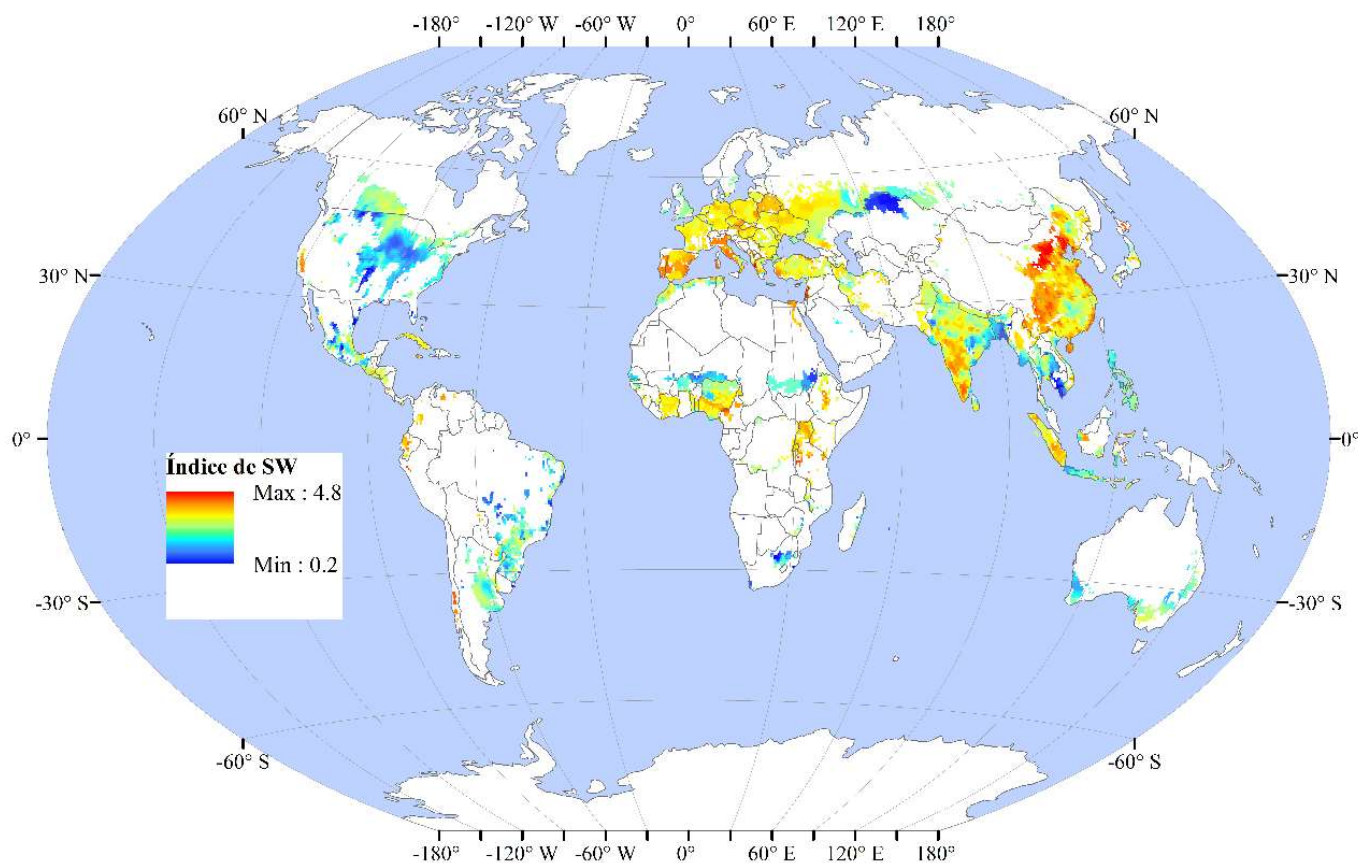


Figura 3.1. Distribución global de la diversidad de la producción de cultivos en el año 2000. La diversidad fue medida a través del índice de Shannon-Weaver (SW). El tamaño de los píxeles es de 0,5 grados (aproximadamente 50 km en el ecuador) y el análisis incluyó únicamente aquellos cuya superficie cultivada fue mayor o igual al 10% de su superficie total.

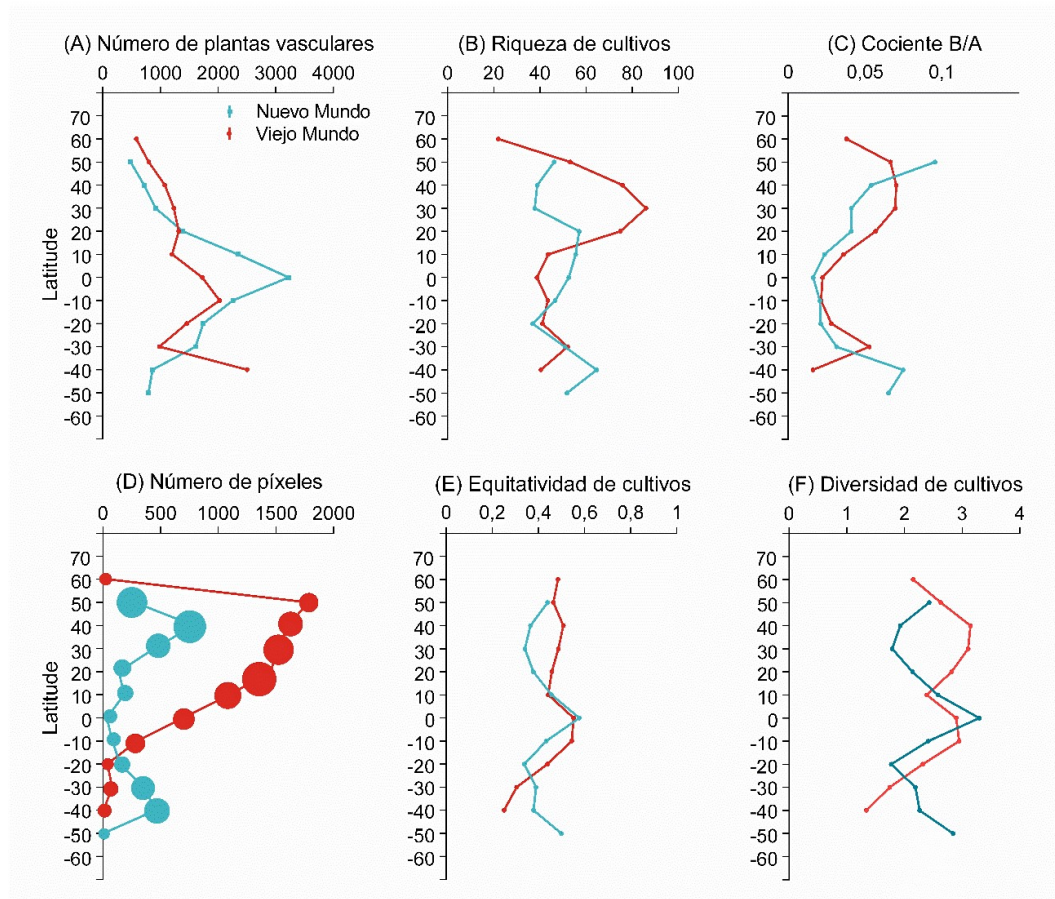


Figura 3.2. Distribución latitudinal de la diversidad, y sus componentes (riqueza y equitatividad), de plantas vasculares y cultivos. A. Número de especies de plantas vasculares. B. Riqueza (número) de cultivos. C. Cociente entre el número de cultivos (B) y de especies de plantas vasculares (A). D. Superficie agrícola estimada como el número de píxeles con agricultura e intensidad relativa (fracción de superficie cultivada respecto al total de la superficie del píxel) representada a través del tamaño del punto, es decir, los puntos más grandes indican un uso más intenso de la tierra. E: Equitatividad de cultivos estimada mediante el índice de Pielou. F. Diversidad de cultivos estimada mediante el índice de Shannon-Weaver. Para todos los gráficos, únicamente se encuentran representados los datos para aquellos píxeles que tuviesen al menos el 10% de su superficie bajo agricultura.

3.3.2. Determinantes de la diversidad global de cultivos

La diversidad de la producción de cultivos en el Viejo y Nuevo Mundo fue explicada por múltiples determinantes y la proporción de la varianza explicada varió entre ellos (Cuadro 3.2 y Figura 3.3). La variación explicada fue más del doble en el Nuevo Mundo (r^2 marginal del mejor modelo = 0,49) con respecto al Viejo Mundo (r^2 marginal del mejor modelo = 0,21). Para ambas regiones, los diez mejores modelos fueron similares en cuanto al equilibrio entre capacidad explicativa y simplicidad (AICc). Por lo tanto, no se encontró un modelo mínimo adecuado que fuera ampliamente superior al resto. A su vez, para ambas regiones, se observó una gran diferencia entre el r^2 condicional y el marginal. En promedio para los mejores modelos, la diferencia fue de 0,53 y 0,31 para el Viejo y Nuevo Mundo, respectivamente. Esto indica que los efectos aleatorios (el nivel de país) fueron importantes en la partición de la varianza, lo que sugiere que la diversidad de cultivos estuvo altamente determinada a

nivel de país, ya que los píxeles contenidos dentro de un mismo país generalmente son similares en cuanto a sus determinantes.

Cuadro 3.2. Modelos de efectos mixtos con mejor ajuste de los determinantes de la diversidad de cultivos según la región (Viejo y Nuevo Mundo). Cada columna representa un modelo o conjunto diferente de determinantes (amarillo, determinantes geográficos; rojo, determinantes biofísicos; verde, determinantes socioeconómicos; azul, determinantes de manejo, ver Cuadro 3.1). De los 255 modelos posibles, se presentan los 10 modelos con mejores ajustes para cada región, ordenados de acuerdo a su valor de AIC. El AIC es una medida del compromiso entre la bondad relativa de ajuste de un modelo dado y su complejidad (penaliza según el número de variables predictoras); cuanto más bajo sea su valor, más probable es que este modelo sea correcto. Las celdas sin sombrear indican determinantes que no fueron incluidos en un modelo en particular. $M r^2$: coeficiente de determinación marginal (incluye solo los efectos fijos); $C r^2$: coeficiente de determinación condicional (incluye efectos fijos y aleatorios); ΔAIC : diferencia entre el AIC de cada modelo y el del mejor modelo; w_i : ponderaciones de Akaike. Todos los modelos tienen el mismo efecto aleatorio, el país como ordenada al origen aleatoria. COS indica carbono orgánico del suelo. PBI indica producto bruto interno. Todas las variables, excepto Tractores (*), fueron determinantes a nivel de pixel. Ver Cuadro Apéndice II.1 para una descripción de los determinantes.

Viejo Mundo													
Modelo	Area	Precipitaciones	Temperatura	COS	Pendiente	Densidad de población	PBI per capita	Tamaño de lote	Aislamiento	Idiomas	Agricultura 1700	Nitrógeno	Riego
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
Nuevo Mundo													
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													

El Viejo y el Nuevo Mundo tuvieron algunos determinantes similares en cuanto a su importancia relativa y magnitud de efecto, y para ambas regiones todas las hipótesis tuvieron al menos un determinante importante (Figura 3.3). Sin embargo, existieron algunas diferencias entre regiones en cuanto a sus determinantes. La principal diferencia observada fue respecto a los determinantes socioeconómicos, debido a que ninguno de ellos fue similar en términos de importancia relativa y magnitud (signo e intensidad) del efecto. En ambas regiones, el área cultivada y las precipitaciones tuvieron una fuerte asociación negativa con la diversidad de cultivos, mientras que la aplicación de fertilizante nitrogenado (fertilizante sintético y estiércol) tuvieron una

fuerte asociación positiva. El carbono orgánico del suelo, el aislamiento (distancia a ciudades) y el riego también fueron factores importantes; sin embargo, su efecto fue diferente entre regiones. Con excepción de la densidad de población que no resultó importante en ninguna de las regiones, el resto de los determinantes fueron importantes en una región, pero no en la otra (Figura 3.3).

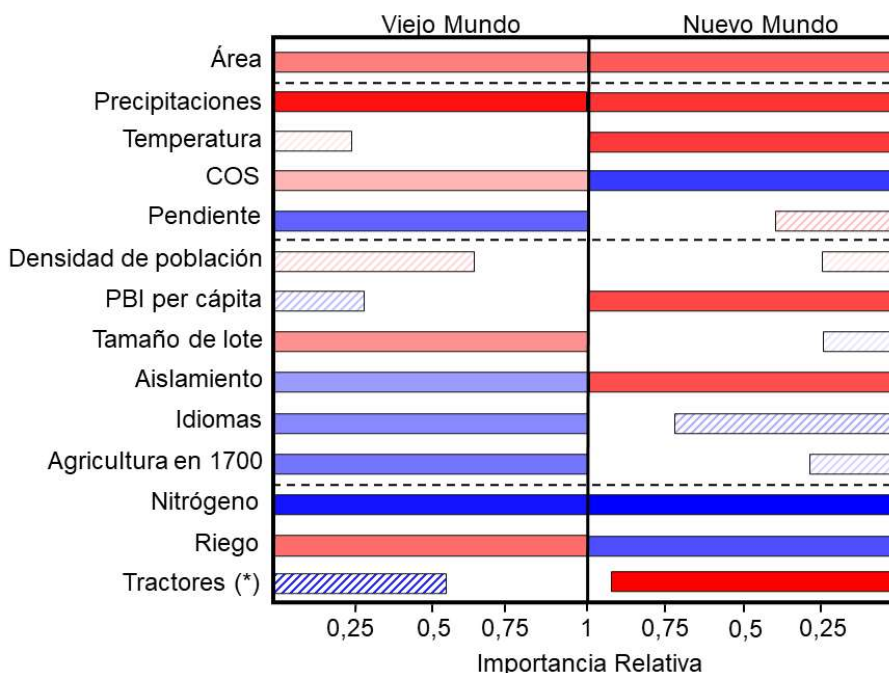


Figura 3.3. Importancia relativa (tamaño de la barra) y magnitud del efecto (color e intensidad) de los determinantes de la diversidad de cultivos para el Viejo (Izquierda) y Nuevo Mundo (Derecha). La importancia relativa de cada determinante fue calculada como la suma de los pesos del criterio de información de Akaike (AIC) de los modelos que incluyeron a dicho determinante (ver materiales y métodos). Azul y rojo indican efectos positivos y negativos, respectivamente. La intensidad de los colores indica la magnitud del efecto relativo de cada determinante que es el resultado de promediar sus coeficientes en los modelos con mejor ajuste. Los modelos con mejor ajuste son aquellos que acumulan al menos el 95% de las ponderaciones de Akaike (wi). Las barras ralladas indican controladores no significativos ya que su intervalo de confianza incluye el cero. Todas las variables, excepto Tractores (*), fueron determinantes a nivel de pixel.

3.4. Discusión

En este capítulo se evaluaron de manera conjunta los patrones y los determinantes de la diversidad de la producción de cultivos a escala global por primera vez. El análisis se realizó al mayor nivel de detalle espacial posible dados los datos existentes. Si bien los datos utilizados presentan entre 15 y 20 años de antigüedad, en la actualidad la mayoría del área cultivada probablemente no haya cambiado su diversidad de cultivos de forma significativa (Alexandratos & Bruinsma 2012). Sin embargo, en algunas regiones, es esperable que hayan ocurrido cambios importantes en la superficie cultivada y composición de cultivos. Por ejemplo, la expansión de la soja en América del Sur o de la palma aceitera en el sudeste de Asia. Generar una base de datos actualizada similar a la utilizada en este trabajo (Monfreda et al. 2008) y otras de períodos anteriores (Leff et al. 2004), debería ser una prioridad para próximos estudios y sería fundamental, no sólo para analizar tendencias espaciales detalladas de la

diversidad de cultivos, sino también para discriminar con mayor robustez la importancia relativa de deferentes determinantes.

A escala global, la diversidad de cultivos producidos no coincidió con el gradiente latitudinal descrito para las plantas vasculares silvestres. En cambio, contrario a lo que han reportado otros autores que utilizaron datos a nivel de país (Nelson et al. 2016), la diversidad de cultivos fue alta tanto en regiones templadas como tropicales y, además, el Viejo y el Nuevo Mundo no mostraron el mismo patrón geográfico. En ambas regiones, algunas de las áreas que albergan una gran diversidad de cultivos coincidieron con los orígenes primarios y secundarios de la domesticación de cultivos (centros de origen de Vavilov). Entre ellos se encuentran la Medialuna Fértil (desde el río Nilo en Egipto hasta el Golfo Pérsico en el sur de Irán), el Mediterráneo, el este de China, de India, de Indonesia y Etiopía, y partes de América Central y los Andes del Norte (Price y Bar-Yoseff 2011). A su vez, la elevada área cultivada y diversidad en Europa y Asia podría ser el resultado de una larga historia agrícola acompañada de una gran difusión de cultivos entre sitios de domesticación. Como sugiere Diamond (1997), la fuerte orientación este-oeste de Eurasia permitió una rápida difusión de cultivos, pues regiones comprendidas dentro de un mismo rango latitudinal generalmente tienen clima y fotoperiodo similar y, por lo tanto, mayor facilidad para la expansión geográfica de los cultivos.

La diversidad de cultivos se concentró fundamentalmente en el Viejo Mundo (Europa, África y Asia) con algunos focos dispersos en el Nuevo Mundo, en particular en el norte (valle central de California), centro (sur de México, Guatemala y Cuba) y sur (norte y sur de los Andes) de América. Estos patrones geográficos son similares a los que presentan Herrero et al. (2017). Mientras que en este estudio se incluyeron únicamente cultivos y está basado en su área cultivada, Herrero et al. (2017) incluyen especies animales y vegetales, por lo cual la diversidad está calculada sobre energía comestible, proteína y micronutrientes en vez de área cultivada. Los patrones espaciales descritos en este capítulo sugieren que la diversidad de cultivos estuvo determinada por el Intercambio Colombino además de por la Revolución Neolítica (origen de la agricultura), tal como se describió anteriormente. La expansión colonial de Europa, que también impactó sobre algunas áreas del Viejo Mundo (ej. Sudáfrica, Diamond et al. 1997), se llevó a cabo mediante un intercambio asimétrico de cultivos y ganado (Crosby et al. 1977). Esta redistribución permitió enriquecer la canasta de cultivos producidos y consumidos en el Viejo Mundo y, si bien, la diversidad de cultivos en algunos sistemas agrícolas americanos precolombinos creció (Khoury et al. 2016), esto fue contrarrestado por la expansión simultánea de una agricultura colonial fuertemente basada en cultivos foráneos orientados a la exportación (ej. bananas, trigo, caña de azúcar, Arnold 1996, Mann 2011). Sin embargo, no está bien documentado el efecto de la expansión agrícola post-colonización en los escasos focos agrícolas precolombinos (ej. Andes, Centroamérica). Actualmente, las áreas agrícolas poco diversas y con producción orientada al consumo distante del Nuevo Mundo persisten no como colonias sino como economías de enclave (de Janvry 1981). Sin embargo, las áreas mediterráneas de Chile y California demuestran que existen situaciones de producción agrícola comercial con elevados niveles de diversidad, tal vez asociados a su importancia como focos de producción hortícola exportable a otras regiones.

Además de la Revolución Neolítica y el Intercambio Colombino, los otros dos procesos históricos que determinaron cambios importantes en la agricultura fueron la Revolución Industrial y la Revolución Verde (Hunter et al. 2017). Estos se asociaron

con el uso creciente de fertilizantes y pesticidas sintéticos, variedades de alto rendimiento, mecanización, riego y rotaciones de cultivos, entre otros (Mazoyer y Roudart 2007). Aunque algunos de estos determinantes se incluyeron en este análisis, otros importantes como el uso de pesticidas y el uso de variedades de cultivos de alto rendimiento no fueron incluidos. A su vez, otros insumos o subsidios de energía, como por ejemplo la mecanización, fueron incluidos como determinantes a nivel de país (número de tractores). Al igual que para la información de cultivos, este estudio indica que a futuro sería importante generar bases de datos que permitan caracterizar los sistemas de producción agropecuaria de forma más exhaustiva y espacialmente detallada, que incluya información respecto al nivel de mecanización y variedades de cultivos, entre otros.

Los resultados obtenidos sugieren que la importancia relativa y la magnitud del efecto de algunos de los determinantes fue similar entre regiones, mientras que otros fueron diferentes. Independientemente de la región, las áreas con mayor uso relativo de la tierra (cociente entre superficie cultivada y superficie del pixel) generalmente tuvieron menos diversidad. Esto contradice la relación especies-área, una de las pocas leyes de la ecología, que indica que a mayor área generalmente hay mayor diversidad de especies (Rosenweig 1995). Sorprendentemente, el mayor uso relativo de la tierra no estuvo asociado con un mayor uso de insumos y tecnología (ej. fertilización, riego, Cuadro Apéndice II.2 y Cuadro Apéndice II.3). Además del área cultivada relativa, otro de los determinantes con similar magnitud de efecto e importancia relativa entre regiones, fue la precipitación media anual. El efecto negativo de este determinante implica que una mayor disponibilidad de agua no se asoció a mayor diversidad de cultivos. Varios centros de origen de Vavilov están ubicados en zonas semiáridas o estacionalmente secas. Por lo tanto, algunos autores han sugerido que la ubicación geográfica del auge de la agricultura podría ser el resultado de una adaptación a entornos estresantes donde los alimentos obtenidos por la caza y la recolección son inestables (Brush 2004, Diamond 1997, Price y Bar-Yosef 2011). La asociación negativa entre la temperatura media anual y la diversidad de cultivos y la elevada diversidad en regiones tropicales del Nuevo Mundo resulta contradictorio a simple vista. Sin embargo, en esta región, la agricultura diversificada cerca del ecuador se encuentra en tierras altas con temperaturas relativamente templadas, mientras que las zonas cálidas, principalmente en algunas partes de América Central y el norte de Argentina, Brasil y Paraguay tienen grandes extensiones de monocultivos agrícolas de maíz, soja y caña de azúcar (Ramankutty et al. 2018).

La pendiente topográfica únicamente fue importante en el Viejo Mundo y su efecto positivo determina que las áreas montañosas, con una elevada heterogeneidad ambiental, son relativamente más diversas. Esto coincide con el hecho de que una proporción importante de los centros de domesticación primaria o secundaria se encuentran en áreas montañosas (Diamond 1997). La pendiente se encuentra entre el conjunto de condiciones que están generalmente asociadas a ambientes marginales para la producción agrícola moderna (Aide y Grau 2004). En estos ambientes, los avances tecnológicos derivados de la Revolución Verde no tienen una ventaja relativa sobre la agricultura tradicional (Brush, 2004). El hecho de que la pendiente no haya tenido una asociación significativa con la diversidad de cultivos en el Nuevo Mundo podría deberse al hecho de que la mayor parte de la agricultura en esta región se realiza en áreas relativamente planas, como por ejemplo el Cinturón Maicero y las Grandes Planicies de América del Norte, la Pampa, el Chaco y el Cerrado en América del sur y las franjas templadas costeras de Australia. Sin embargo, las zonas andinas del Nuevo Mundo son

áreas de gran diversidad de cultivos, pero representan una fracción pequeña respecto al total de agricultura de esta región.

La ausencia de determinantes socioeconómicos comunes entre el Viejo y el Nuevo mundo es un indicio del diferente contexto cultural, social y económico en el cual se desarrolla la agricultura en cada región. La mayoría de los grandes cinturones agrícolas del Nuevo Mundo se encuentran en áreas relativamente despobladas, en las cuales se producen principalmente cultivos extensivos (cereales y oleaginosas) con elevados niveles de insumos y tecnología, y orientadas a la comercialización (Ramankutty et al. 2018). Por el contrario, en el Viejo Mundo los principales cinturones agrícolas albergan tanto agricultura de subsistencia como de mercado, pero allí la agricultura aún está fuertemente determinada por factores culturales y sociales locales más que por demandas distantes (Ellis et al., 2010). En esta región, una mayor diversidad de cultivos está asociada a la presencia de campos más pequeños, con una historia agrícola más larga, con mayor diversidad de idiomas (proxy de diversidad cultural) y, también, con un mayor aislamiento a mercados locales y globales, lo cual podría ser una barrera para mantener la diversidad cultural local. Sin embargo, es necesario resaltar que dentro de las regiones hay excepciones a estos patrones generales como, por ejemplo, la agricultura de subsistencia en los Andes y América Central, la agricultura diversificada de altos insumos en California y Chile, y los monocultivos de palma aceitera en el sudeste asiático.

En ambas regiones, la elevada importancia relativa y magnitud del efecto de los determinantes relacionados con el manejo, representan la tendencia histórica de los sistemas agrícolas de reducir su dependencia del medio ambiente. En ambas regiones, la fertilización nitrogenada (incluye fertilizante sintético y estiércol) se asoció positivamente con la diversidad. Esto es contrario a lo que ocurre en muchos sistemas naturales o seminaturales, en los cuales el agregado de nitrógeno reduce la diversidad de especies, pues las más eficientes en su uso desplazan competitivamente a las menos eficientes (Bobbink 2010). La asociación positiva entre la fertilización y la diversidad de cultivos podría deberse a que los cultivos que reciben una mayor fertilización generalmente son frutas y verduras (Jobbágy y Sala 2014) y los sistemas que producen este tipo de cultivos generalmente son más diversos. A diferencia de la fertilización, el riego tuvo signo contrapuesto en cada región. En el Nuevo Mundo, la relación positiva con la diversidad de cultivos podría indicar que el riego es importante en áreas donde la producción de hortalizas y frutas es importante (California, Ecuador, Chile, sur de México), mientras que los cultivos extensivos como los cereales y los cultivos oleaginosos generalmente son poco regados (Seibert et al. 2015). Por el contrario, en el Viejo Mundo, aunque con varias excepciones (ej. delta del Río Nilo en Egipto), el riego está fuertemente asociado al monocultivo de producción de arroz que se realiza en Asia (Seibert et al. 2015).

La proporción de la varianza explicada por los determinantes fue diferente entre regiones. Mientras que en el Nuevo Mundo se explicó aproximadamente la mitad de la varianza, en el Viejo Mundo menos de un cuarto. Esto sugiere que la diversidad de cultivos en el Viejo Mundo es altamente idiosincrática y podría ser el reflejo de los diversos contextos socio-ecológicos en los cuales se desarrolla la agricultura. Por el contrario, la relativamente alta proporción de la varianza explicada en el Nuevo Mundo podría indicar que allí la mayoría de la agricultura, con bajos niveles de diversidad y explicada fundamentalmente por el cultivo de cereales y oleaginosas, se realiza en

contextos biofísicos y humanos relativamente homogéneos (Ellis et al. 2010, Ramankutty et al. 2018).

3.5. Conclusiones

En conjunto, los resultados presentados aquí sugieren que la diversidad de cultivos producidos no coincidió con el gradiente latitudinal descrito para las plantas vasculares silvestres. En cambio, actualmente es posible encontrar regiones de alta diversidad de cultivos tanto en regiones templadas como tropicales. Los patrones actuales de la diversidad de cultivos reflejan la interacción entre múltiples factores que la han moldeado desde los orígenes de la agricultura (Revolución Neolítica) hace más de 10000 años. A medida que ha pasado el tiempo, la impronta relativa del ambiente (ej. clima, topografía) perdió importancia y la agricultura se ha vuelto menos dependiente de su variación espacial y temporal. Sin embargo, las principales áreas de domesticación primaria y secundaria de los cultivos, cuya ubicación estuvo fuertemente determinada por el ambiente, aún conservan elevados niveles de diversidad de especies cultivadas. Fuera de estas regiones, la diversidad de cultivos es el resultado de otras contingencias que han tenido lugar a lo largo de la historia, principalmente del Intercambio Colombino. Esta contingencia generó una fuerte redistribución de cultivos que afectó diferencialmente la canasta de cultivos de las diferentes regiones. Aunque ambas regiones enriquecieron sus canastas, la expansión de la agricultura colonial en el Nuevo Mundo fue a expensas de unos pocos cultivos orientados a satisfacer demandas distantes. Posteriormente, la Revolución Industrial y la Revolución Verde parecen haber acentuado las diferencias previas entre el Viejo y el Nuevo Mundo. El hecho de que existan regiones que se separan de los patrones generales refleja la complejidad de los procesos que las determinan. Asociado a esto, estudios futuros deberían explorar patrones similares a los que hemos descrito en este trabajo, pero a escalas espaciales de mayor detalle. Sería interesante que estos trabajos incluyeran procesos históricos locales y regionales que pueden haber jugado un rol tan importante como aquellos de nivel global descritos aquí. A su vez, la baja proporción de la varianza explicada por los determinantes incluidos podría reflejar también, por un lado, la complejidad e idiosincrasia de los procesos abordados y, por otro, una limitación de los datos y de la aproximación analítica empleada. Respecto a la segunda, numerosos determinantes potenciales fueron excluidos del análisis por razones estadísticas y probablemente existan otros no incluidos en este trabajo que podrían contribuir a explicar los patrones geográficos con mayor robustez.

Este trabajo es un primer intento por comprender los patrones geográficos globales de la diversidad de cultivos y los factores que los determinan, lo cual resulta fundamental para elaborar estrategias para su conservación e incremento. Las condiciones socio-ecológica actuales y futuras serán muy distintas a las que determinaron la diversidad de cultivos en los albores de la agricultura, por lo cual las estrategias para su conservación deberán contemplar escenarios de fuerte cambio social y ambiental (Zimmerer y de Haan 2017). Además de estudios como este, se requerirán de otros a distintas escalas espaciales y niveles de organización (ej. variedades, paisajes) para comprender mejor que condiciones humanas y biofísicas se asocian a la preservación de la diversidad. Además de mayor conocimiento, la conservación de la diversidad de cultivos requerirá de múltiples estrategias ya que este trabajo indica que las condiciones en las cuales es preservada actualmente son muy variadas.

Capítulo 4

Dinámica y distribución de la producción de granos y de las existencias de ganado vacuno en Argentina, Brasil y Paraguay (2002-2015)

4. Capítulo 4: Dinámica y distribución de la producción de granos y de las existencias de ganado vacuno en Argentina, Brasil y Paraguay (2002-2015)

4.1. Introducción

La creciente demanda de alimentos, fibras y energía de los países desarrollados y emergentes está siendo abastecida principalmente por la expansión e intensificación de la agricultura en diferentes regiones del Sur Global (Curtis et al. 2018). Desde comienzos del siglo XXI, varios países de Sudamérica han constituido los principales focos globales que han abastecido esta demanda (Graesser et al. 2015). Sus relativamente despoblados territorios rurales, sumados a su elevada potencialidad agrícola, determinan que exista una fuerte presión por expandir el aprovechamiento de sus recursos naturales (Lambin et al. 2013). Sin embargo, su elevada diversidad biológica y cultural (Balvanera et al. 2012, Myers et al. 2000), los altos niveles de carbono en sus ecosistemas terrestres (Saatchi et al. 2011) y una larga historia de desigualdad en la tenencia y acceso a la tierra (Guereña 2016, Lapola et al. 2014) son algunas de las características que configuran un escenario de tensión e intereses contrapuestos ante la expansión productiva.

Además de la creciente demanda de alimentos, fibra y energía, otros factores determinaron la expansión e intensificación de la producción agropecuaria en Sudamérica. Entre ellos, se encuentran forzantes tecnológicos (semillas genéticamente modificadas, siembra directa), económicos (devaluación de las monedas locales, disponibilidad de créditos y aparición de nuevos actores sociales), infraestructura (más y mejores rutas y puertos) y climáticos (períodos de mayores precipitaciones en algunos sectores semiáridos) (Baldi y Paruelo 2008, Fearnside 2005, Garrett et al. 2013, Grau et al. 2005, Lapola et al. 2014, Pfaff et al. 2007, Satorre 2005, Viglizzo et al. 2011). Los cambios en el uso de la tierra derivados de estos forzantes han sido ampliamente documentados en las regiones que han sufrido las transformaciones más importantes desde comienzos del siglo XXI. Entre ellas se encuentran los pastizales del Río de la Plata (Baldi y Paruelo 2008), los bosques y sabanas estacionalmente secas del Chaco (Baumann et al. 2017, Gasparri et al. 2013, Vallejos et al. 2015) y del Cerrado (Lapola et al. 2010), y los bosques húmedos de las Yungas (Nanni y Grau 2014), la mata Atlántica (Ribeiro et al. 2009) y el Amazonas (Arima et al. 2011, Barona et al. 2010, Macedo et al. 2012). La mayoría de estos trabajos se enfocan en regiones o biomas específicos y describen los cambios en el área dedicada a diferentes usos de la tierra. Aproximaciones similares de escala continental muestran que, durante los últimos 15 años, la agricultura tendió a avanzar sobre áreas de producción ganadera, y ésta sobre bosques secos y húmedos, principalmente del Chaco, Cerrado y Amazonas (Clark et al. 2010, De Sy et al. 2015, Graesser et al. 2015). Son menos los estudios que se concentran en los cambios en la producción, y corresponden principalmente a Brasil (Barreto et al. 2013, Dias et al. 2016). Dado que Argentina, Brasil y Paraguay han atravesado procesos simultáneos de expansión y transformación de la agricultura y la ganadería y, que en conjunto representan uno de los focos exportadores de granos y carne vacuna más importantes del planeta (Suweis et al. 2014), una caracterización conjunta y comparativa de las trayectorias productivas de sus territorios podría contribuir a proyectar cambios futuros y a guiarlos de formas más virtuosas.

A escala global, la tierra disponible para expandir ha comenzado a ser escasa y por consiguiente ha aumentado la competencia entre usos (Lambin y Meyfroidt 2011). Esto ha llevado a que numerosos estudios actuales revisen la interacción entre usos de la

tierra. Por ejemplo, se ha estudiado la relación entre agricultura y conservación y la posibilidad de balancearlos (debate *land sharing* vs. *land sparing*, Kremen 2015), así como las relaciones entre urbanización y conservación (Stott et al. 2015), y agricultura y urbanización (d'Amour et al. 2017). Sin embargo, la interacción entre los dos componentes principales de la producción primaria, que son la agricultura y la ganadería, ha recibido menor atención. Esto podría deberse a que ambos usos están asociados a la producción de alimentos y, por ende, se los trata conjuntamente a la hora de explorar como se los armoniza con la provisión de otros servicios ecosistémicos. Sin embargo, estas dos actividades y su uso del territorio pueden experimentar competencia o sinergia según la forma en que se implementen. Por ejemplo, las pasturas que alimentan al ganado pueden ser desplazadas por cultivos anuales y, por ende, generar escenarios de competencia como los que se ha planteado que ocurrió en Argentina en la década del noventa (ej. Paruelo et al. 2005). Por otra parte, una fracción importante de la producción global de granos, particularmente de soja y maíz, es utilizada para alimentar ganado y esto puede crear localmente, en las zonas de producción de estos cultivos o zonas vecinas, aumentos en la producción ganadera (Herrero et al. 2015). Por lo tanto, pueden existir una relación de competencia (Macedo et al. 2012, Vega et al. 2009) o de sinergia, como se plantea en India donde ambas actividades están íntimamente asociadas (Baldi et al. 2013). Más allá de sus interacciones territoriales, los efectos de la ganadería y la agricultura sobre la prestación de servicios a la sociedad pueden ser contrastantes ya que producen alimentos con diferentes niveles de eficiencia (Cassidy et al. 2013) y tienen impactos ambientales distintos (Clark y Tilman 2017). En este contexto, describir y cartografiar la dinámica conjunta de estas actividades es fundamental para caracterizar trayectorias de uso de la tierra o de producción (síndromes productivos), lo cual representa uno de los desafíos actuales de las ciencias del uso de la tierra (Boillat et al. 2017, Rounsevell et al. 2012).

La dinámica espaciotemporal de la agricultura y la ganadería bovina puede describirse en cuanto a sus cambios en producción, superficie, composición y rendimiento. Tal como se indicó anteriormente, la mayoría de los estudios describen los cambios en estas actividades a través de la superficie destinada a ellos. Además, un componente de la producción generalmente tomado por alto es la composición de cultivos que se siembran o del ganado que se cría. Qué especies se cultivan o crían determina no solo qué, y cuánto se produce, sino también con qué eficiencia en el uso de los recursos (ej. agua, nutrientes, radiación, Jobbágy y Sala 2014). Describir los cambios en todos estos componentes resulta difícil debido a información limitada. Sin embargo, muchos países cuentan con información anual a escala subnacional que permite realizar un análisis de descomposición aditiva de los componentes que determinaron los cambios en la producción de cultivos (Jobbágy y Sala 2014, Kastner et al. 2012). Puesto que gran parte de Sudamérica presenció fuertes cambios en su composición de cultivos en los últimos años (Figura Apéndice I.1) resulta fundamental describir cuales fueron las consecuencias que tuvo esto sobre la producción y como se asociaron estos cambios a las trayectorias productivas.

Las trayectorias productivas o transiciones en el uso de la tierra están asociadas a diversos controles biofísicos y humanos. Estos controles determinan las actividades que pueden ser realizadas en diferentes porciones del territorio, es decir, actúan como filtros o determinantes espaciales (Meyfroidt 2016). Por ejemplo, por el lado de los controles biofísicos, la agricultura de secano precisa al menos 600 mm anuales de precipitación para poder realizarse, mientras que la ganadería puede realizarse en ambientes más áridos. Por lo cual, ciertos controles, o rangos particulares de ellos, pueden determinar

que alguno de las actividades se realice y la otra no, o que haya situaciones de coexistencia. En cuanto a los controles humanos, por ejemplo, la cercanía a puertos o la densidad de rutas pueden determinar que sea más rentable realizar una actividad u otra. Numerosos trabajos han descripto los controles de los cambios en el uso de la tierra en diferentes ecoregiones de Sudamérica, cuyo foco principal ha sido la deforestación (Boillat et al. 2017). Sin embargo, pocos han explorado en qué condiciones son más frecuentes determinadas trayectorias productivas.

El objetivo general de este trabajo fue describir los cambios (2002-2015) en la magnitud, composición y distribución de la producción agrícola y ganadera en una de las regiones del mundo en donde el crecimiento de la producción ha sido máximo y destinado principalmente a satisfacer demandas internacionales. La aproximación metodológica consistió en la construcción y análisis de datos espaciales y temporales obtenidos a partir de estadísticas públicas de cada país. En particular, describimos la dinámica espacial de la producción agrícola y ganadera a escala subnacional en Argentina, Brasil y Paraguay. Luego, analizamos la dinámica conjunta de ambas actividades y las caracterizamos bajo el concepto de trayectorias productivas (por ej. incremento conjunto, incremento de una actividad y retracción de la otra, etc.). Analizamos en qué medida estas trayectorias productivas estuvieron asociadas a diversas variables biofísicas (ej. precipitaciones, pendiente topográfica) y humanas (ej. historia de uso, distancia a puertos). A continuación, para aquellas trayectorias que presentaron cambios significativos en la producción agrícola, determinamos, a través de un análisis de descomposición aditiva, en qué medida estos cambios se debieron a variaciones en el área sembrada, en el rendimiento o en la composición de cultivos. Finalmente, a la luz del conocimiento actual sobre los procesos de uso de la tierra en Sudamérica, agrupamos a las trayectorias productivas en síndromes de cambios en el uso de la tierra.

4.2. Materiales y métodos

Se recopiló información de cultivos agrícolas extensivos (superficie sembrada, rendimiento y producción, los cultivos incluidos se listan en el Apéndice III) y de ganadería (existencias de ganado vacuno) a escala anual (entre 2002-2015) y subnacional para Argentina, Brasil y Paraguay. La lista de cultivos considerados representó >85% del área sembrada en los tres países. Dado que los países tienen organizaciones territoriales y relevamientos de información agropecuaria con distinto nivel de detalle espacial, utilizamos información proveniente de diferentes niveles en cada país buscando armonizar la resolución espacial de la información en todos ellos (Cuadro 5.1). Para Argentina y Paraguay utilizamos el nivel de departamento, aunque este nivel no representa la misma jerarquía en ambos países. Para Argentina fueron excluidos los departamentos de las provincias patagónicas. En el caso de Brasil, la información no corresponde a la de una unidad administrativa sino a un nivel territorial al cual se recopila la información agropecuaria (microrregión). A partir de aquí, independientemente del país, nos referiremos a las unidades de análisis como “unidades territoriales”.

Para el análisis de la dinámica espacio-temporal de la agricultura y la ganadería, se filtraron aquellas unidades territoriales que tuviesen niveles poco relevantes de cada actividad. Para la agricultura, se incluyeron en el análisis aquellas unidades territoriales que, en promedio a través del tiempo, tuviesen al menos el 1% de su superficie total con cultivos extensivos y 4 años con agricultura (Graesser et al. 2015). Para la ganadería, el

criterio temporal de 4 años fue el mismo, mientras que se incluyeron aquellas unidades territoriales que, en promedio a través del tiempo, tuviesen al menos 500 cabezas de ganado bovino. El criterio menos restrictivo, y basado en valores absolutos, para la ganadería tuvo la finalidad de incluir mayor cantidad de unidades territoriales en el análisis. Dado que existe una elevada variabilidad en la superficie de las unidades territoriales, los valores de producción agrícola total (suma de todos los cultivos) y de existencias bovinas fueron relativizadas por el área total de la unidad territorial. A partir de aquí nos referiremos al área total de las unidades territoriales como “superficie administrativa”, y a la producción agrícola total y a las existencias bovinas relativizadas, como “producción agrícola relativizada” y “existencias relativizadas”, respectivamente. Describimos los cambios de ambas actividades según biomas, para lo cual utilizamos una versión levemente modificada del propuesto por Olson et al. (Figura Apéndice III.1). Analizamos la concentración espacial de cada actividad a través de curvas de Lorenz para el inicio (promedio 2002-2004) y fin (promedio 2013-2015) del período analizado. Para cada momento y actividad, se ordenaron las unidades territoriales de mayor a menor según sus valores relativizados y se acumuló progresivamente la fracción del total de la producción agrícola y de las existencias bovinas.

La dinámica temporal de la agricultura y la ganadería puede ser analizada conjuntamente a través de “trayectorias” al describir su ubicación (un par ordenado por unidad territorial) en un plano cuyos ejes representan el cambio en cada actividad (Figura 4.1). La dinámica temporal de la agricultura fue caracterizada a través del cambio en la producción agrícola relativizada (Figura 4.1.A) y la de la ganadería mediante la variación de las existencias relativizadas (Figura 4.1.B). La tasa anual de cambio para cada actividad fue estimada a través de modelos de regresión cúbica (Graesser et al. 2015, Ray et al. 2012). Se determinó la significancia de cada modelo a través del estadístico F y un valor p inferior a 0,05. Los cambios en las actividades fueron calculados únicamente para aquellos casos cuya tendencia resultó significativa. En caso contrario, se asumió que la actividad no cambió durante el período analizado. Los cambios anuales fueron calculados sobre la base de los valores ajustados por el modelo. Al valor final se le restó el inicial, y al resultado de esta resta se la dividió por la cantidad de años (Figura 4.1.A). Los cambios anuales de cada actividad (un par ordenado por unidad territorial) fueron ubicados en el plano y clasificados en alguna de las 9 trayectorias posibles (a partir de aquí referidas como trayectorias simples, Figura 4.1.C). Las unidades territoriales que están sobre uno de los ejes (trayectorias 5, 6, 7, 8) o sobre los dos (trayectoria 9) implican situaciones en las cuales el cambio de una o ambas actividades no fue estadísticamente significativo o la actividad no fue lo suficientemente importante como ser incluida en el análisis.

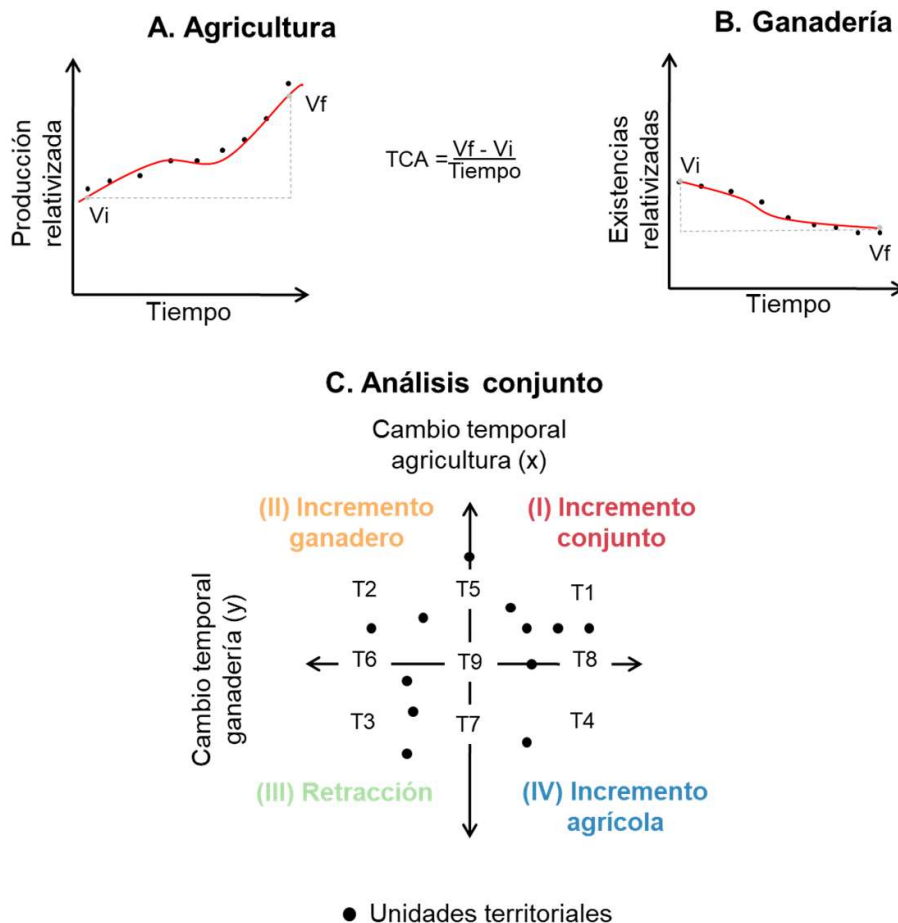


Figura 4.1. Esquema conceptual para el análisis de la dinámica de la producción agrícola (A) y de las existencias de ganado vacuno (B) y las trayectorias productivas derivadas de su descripción conjunta (C). TCA representa tasa de cambio anual y es la forma a través de la cual se estima el cambio temporal de cada actividad (A y B) que luego se utiliza para analizar el cambio conjunto (C). En cada cuadrante se representa el significado de esa combinación de cambio agrícola y ganadero y el número de la trayectoria simple (ej. T1). Es posible agrupar a las trayectorias simples en cuatro trayectorias principales. La trayectoria principal I (incremento conjunto) incluye únicamente la trayectoria simple 1 (T1). La trayectoria principal II (incremento ganadero) incluye las trayectorias simples 2 y 5 (T1 y T5). La trayectoria principal III (retracción) incluye las trayectorias simples 3, 6 y 7 (T3, T6 y T7). La trayectoria principal IV (incremento agrícola) incluye las trayectorias simples 4 y 8 (T4 y T8). La trayectoria simple 9 no está incluida en ninguna trayectoria principal.

Se analizó la asociación de las trayectorias productivas con diversas variables biofísicas y humanas a través de análisis discriminante (Borcard et al. 2011, Legendre y Legendre). El objetivo de este análisis fue determinar bajo qué condiciones son más frecuentes las trayectorias. Se redujo la cantidad de trayectorias para simplificar la visualización y el análisis. Para ello, 8 de las 9 trayectorias simples fueron agrupadas en 4 trayectorias principales (enumeradas con números romanos en la Figura 4.1). La trayectoria simple 9 (ausencia de cambio para ambas actividades) no está incluida en ninguna de las trayectorias principales. La trayectoria principal I (incremento conjunto) incluye únicamente la trayectoria simple 1. La trayectoria principal II (incremento ganadero) incluye las trayectorias simples 2 y 5. La trayectoria principal III (retracción) incluye las trayectorias simples 3, 6 y 7. Finalmente, la trayectoria principal IV incluye

las trayectorias simples 4 y 8. Las variables incluidas, sus fuentes de información y procesamiento se encuentran en el Cuadro Apéndice III.1. Los valores de las variables fueron estandarizados previo al análisis discriminante.

Analizamos los cambios, entre el inicio (promedio 2002-2004) y fin (promedio 2013-2015) del período de estudio, de la producción agrícola total través de un análisis de descomposición aditiva (Jobbágy y Sala 2014). El análisis fue realizado a escala de unidad territorial y también para aquellas trayectorias simples que contemplaran cambios significativos en la producción agrícola relativizada (trayectorias simples 1, 2, 3, 4, 6 y 8). El análisis de descomposición permite aislar en qué medida los cambios en la producción se debieron únicamente a variaciones en el área cultivada, en los rendimientos y en la composición de cultivos. Para ello, la masa producida de los cultivos fue convertida a energía calórica, tal como hacen otros trabajos que analizan cambios en la producción de múltiples cultivos de forma conjunta (Ewers et al. 2009, Barreto et al. 2013). Para ello, se utilizaron los factores de conversión propuestos por FAO (FAO 2001). Las ecuaciones empleadas para estimar la contribución de cada factor de la producción se encuentran descritas en Jobbágy y Sala (2014). Finalmente, se analizaron los cambios en la diversidad de cultivos entre el inicio (promedio 2002-2004) y fin (promedio 2013-2015) del período analizado. Para ello, se calculó el índice de Shannon-Weaver en base a la superficie cultivada de los cultivos. A través de regresión lineal simple, se analizó la relación entre los cambios en la diversidad de cultivos con los cambios en la producción y sus componentes (área, rendimiento y cambio en la composición de cultivos). El cambio de la diversidad de cultivos entre el inicio y el final del período analizado se estimó como el logaritmo del cociente entre el valor final y el inicial.

4.3. Resultados

Al analizar los cambios de la producción de los principales cuatro cultivos extensivos se observó que entre el inicio (promedio 2002-2004) y fin (promedio 2013-2015) del período analizado, la producción agrícola creció conjuntamente un 74% (Figura 4.2). Al descomponer este cambio en sus tres componentes, encontramos que la producción hubiese crecido 36% si únicamente se hubiesen observado los cambios registrados en el área sembrada, 39% si sólo se hubiesen producido los aumentos de rendimiento y -1% si el único cambio hubiese sido la modificación en las proporciones de las especies cultivadas. La producción agrícola incrementó en los tres países, aunque Paraguay presentó aproximadamente el doble de crecimiento respecto a Argentina y Brasil (Figura 4.2). Mientras que en Argentina y Paraguay la producción cambió principalmente debido a cambios en la superficie sembrada, en Brasil fueron más importantes los cambios en los rendimientos. Mientras en Argentina el cambio en la composición de cultivos generó un leve aumento de la producción (avance de maíz sobre soja, Cuadro Apéndice III.2), en Brasil este cambio fue opuesto (soja sobre maíz). Los cuatro principales cultivos presentaron incrementos en área y rendimiento en los tres países y hubo pocas excepciones a este patrón general (trigo en Argentina y arroz en Argentina y Paraguay, Cuadro Apéndice III.2). A fines del período, la soja representaba cerca de 2/3 partes del área sembrada total. Finalmente, el crecimiento de las existencias de ganado vacuno fue muy inferior (5%) al de la producción agrícola. La divergencia entre países fue más grande en este caso puesto que mientras las existencias ganaderas crecieron en Brasil (9%) y Paraguay (48%), en Argentina se redujeron (-16%, Cuadro Apéndice III.2).

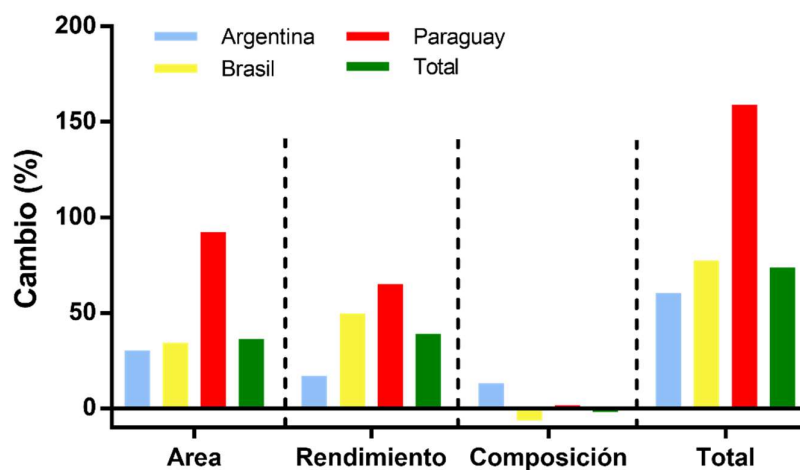


Figura 4.2. Cambios en la producción agrícola conjunta y de los tres países por separado. Los valores surgen de la descomposición aditiva de la producción, por lo cual la suma del cambio en área, rendimiento y composición es igual al cambio total.

El cambio en la distribución territorial de la producción agrícola mostró una combinación de expansión radial de focos existentes y aparición de nuevos focos durante el período analizado (Figura 4.3). La mayor parte de la producción agrícola está concentrada en los pastizales y sabanas templadas de Argentina y Brasil, la porción sur del bosque Atlántico y el bosque Paranaense en Brasil y Paraguay, y en el Cerrado de Brasil (Figura 4.3). Estas áreas presentaron un crecimiento radial hacia áreas adyacentes, a las cuales se sumaron nuevos focos agrícolas, principalmente en el Chaco argentino y el sur del Amazonas. A su vez, las principales regiones de producción ganadera son similares a las de la producción agrícola, a las cuales se suma el área costera del bosque Atlántico. Las existencias de ganado vacuno presentaron significativas reducciones en el sudoeste de los pastizales y sabanas templadas y un incremento en el Chaco y el Amazonas. La producción agrícola estuvo más concentrada que la ganadera. Mientras que al inicio del período el 50% de la producción se alcanzó con el 12,3% de la superficie administrativa acumulada en el caso de la agricultura, para la ganadería se necesitó el 18,1% de la superficie para alcanzar dicha proporción de las existencias (Figura 4.4). En ambos casos, al analizar los cambios durante el período analizado, se observaron leves disminuciones de la concentración espacial de ambas actividades.

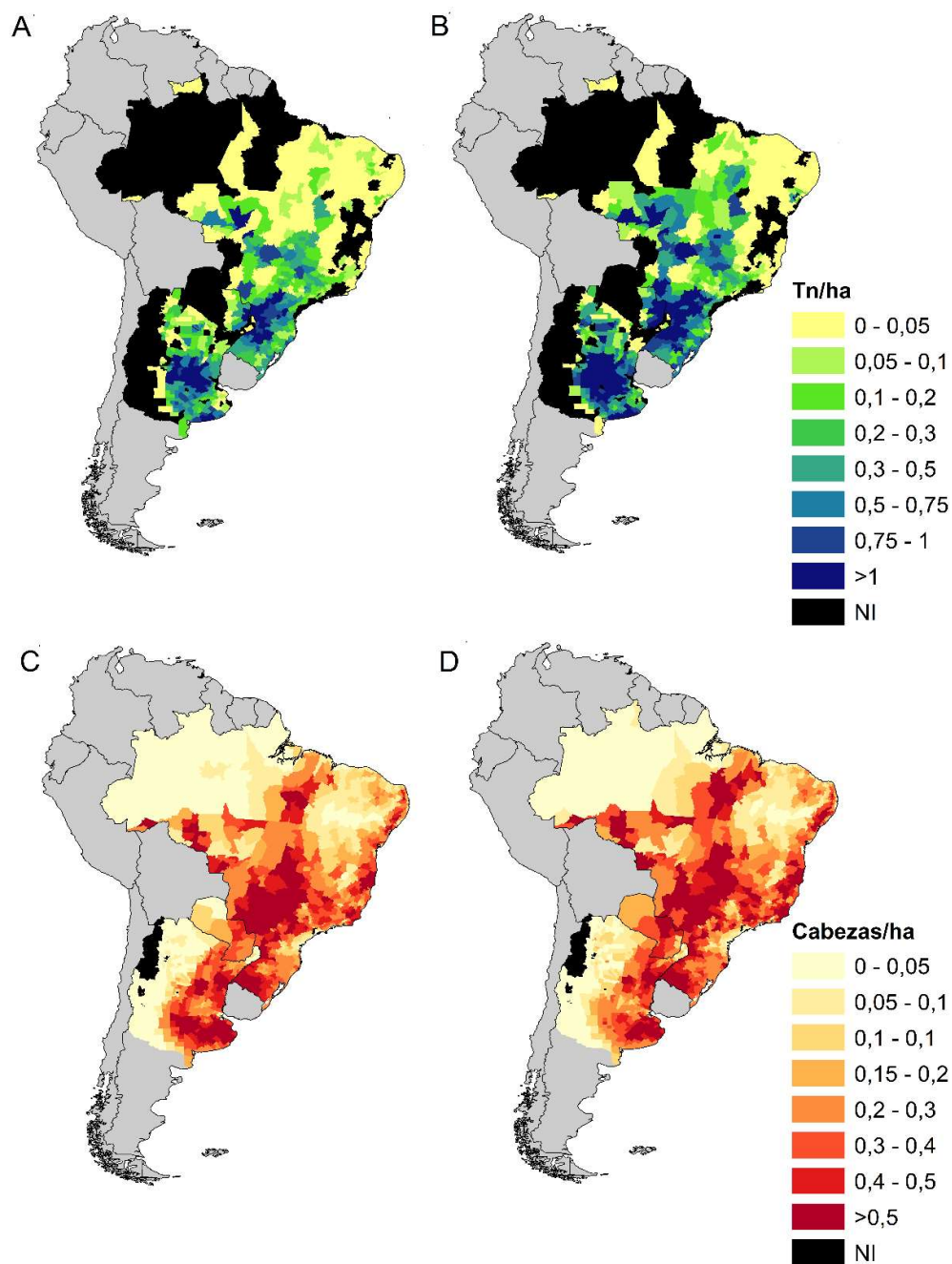


Figura 4.3. Cambios en la producción agrícola relativizada (Tn/ha) y de las existencias de ganado vacuno relativizadas (Cabezas de ganado vacuno/ha) entre el inicio (2002-2004) y fin (2013-2015) del período analizado. A y B: cambio de la producción agrícola al inicio y fin del período analizado, respectivamente. C y D: cambio de la producción ganadera al inicio y fin del período analizado, respectivamente. NI indica que la unidad territorial no fue incluida por no tener volúmenes significativos de producción.

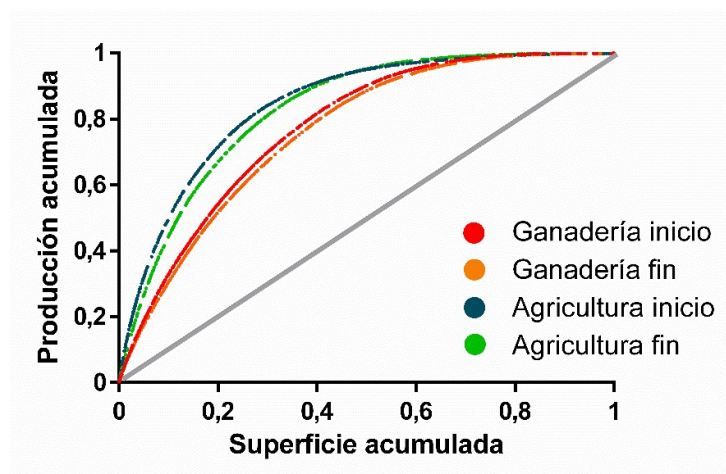


Figura 4.4. Producción y superficie administrativa acumulada para la agricultura y la ganadería en el inicio (2002-2004) y fin (2013-2015) del período analizado. En ambos casos, se acumularon sucesivamente los valores de producción y superficie de las unidades territoriales ordenados de mayor a menor de acuerdo con su producción (toneladas de granos o cabezas de ganado vacuno) relativizada por superficie administrativa.

Al analizar de forma conjunta la dinámica de la producción agrícola y ganadera se identificaron nueve trayectorias simples (numeradas de 1 a 9, Figura 4.5). El mapeo de las trayectorias mostró un elevado nivel de agregación espacial en las mismas (Figura 4.5). Las trayectorias más importantes en cuanto a la superficie administrativa que representan fueron la 5 (incremento ganadero sin cambio agrícola, 32% de la superficie), la 1 (incremento conjunto de ambas actividades, 22% de la superficie), la 4 (incremento agrícola y disminución ganadera, 13% de la superficie) y la 7 (disminución ganadera sin cambio agrícola, 12% de la superficie). Mientras que Argentina y Brasil presentaron las nueve trayectorias, Paraguay únicamente presentó trayectorias que contemplaron el aumento de una o ambas actividades. Existió una fuerte asociación entre las trayectorias y los biomas ($\chi^2=1E-7$, Figura 4.6 A y B). Las trayectorias 1 y 5 fueron más comunes en bosques, ya sea estacionalmente secos (Bioma 4) o húmedos (Bioma 5). A su vez, la trayectoria 4, estuvo asociada principalmente a pastizales y sabanas templadas (Bioma 2). Las demás trayectorias se distribuyeron de forma relativamente equitativa en los diferentes biomas (Figura 4.6.B).

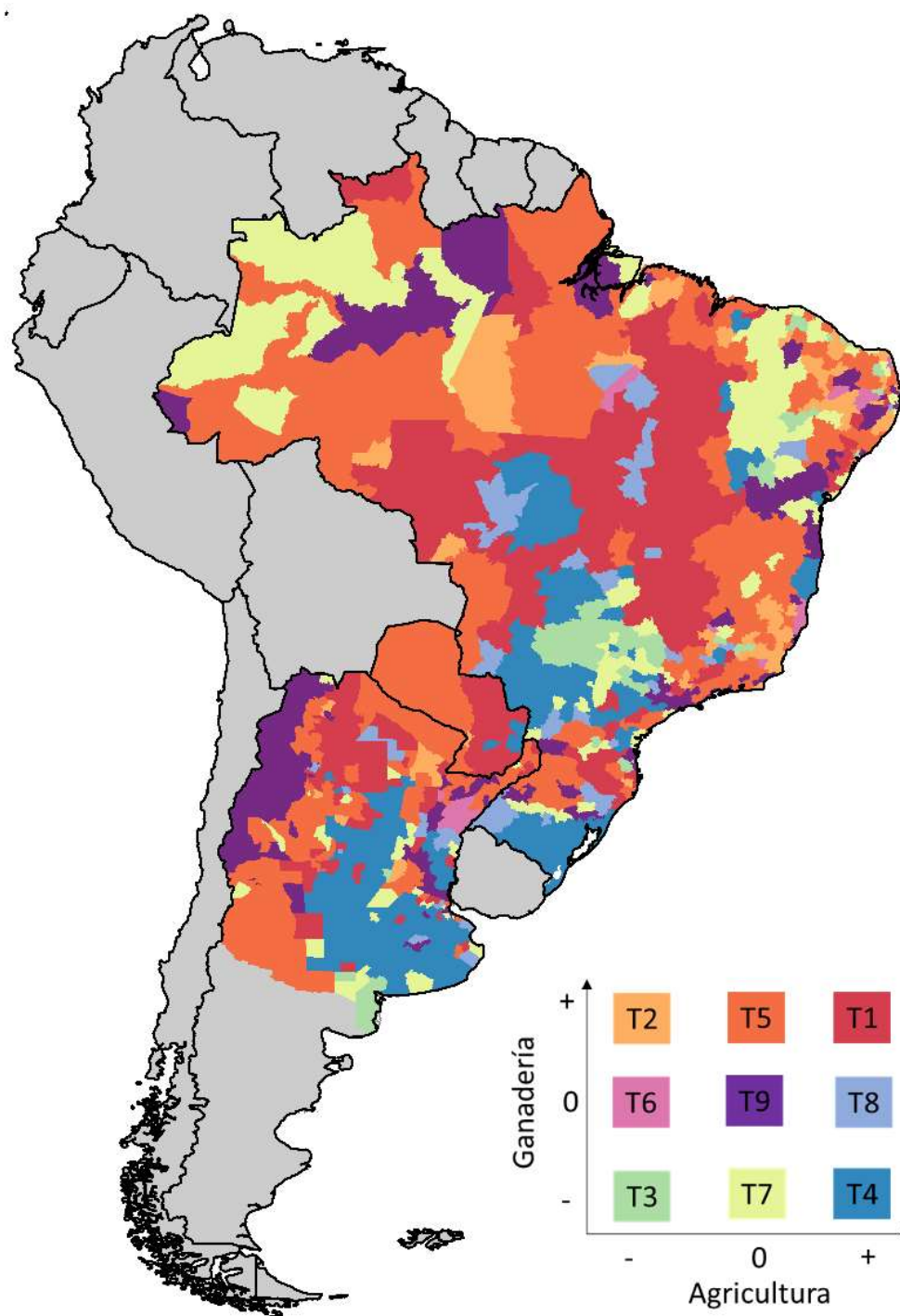


Figura 4.5. Trayectorias productivas resultantes de analizar conjuntamente la dinámica temporal (2002-2015) de la producción agrícola y ganadera. La leyenda del mapa indica las nueve trayectorias posibles (por ej. la trayectoria 1 tuvo lugar en aquellas unidades territoriales en las cuales aumentaron ambas actividades entre 2002-2015)

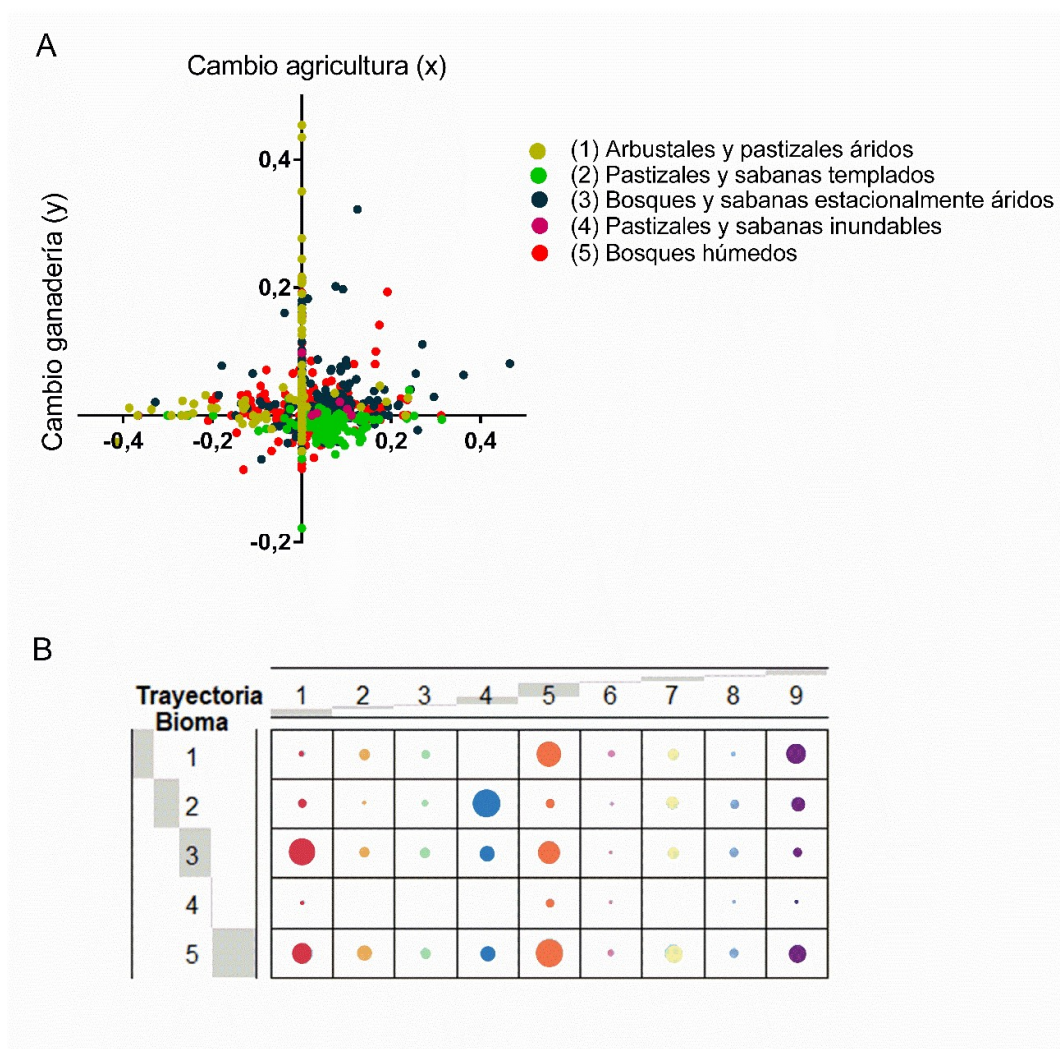


Figura 4.6. Descripción de las trayectorias productivas simples según bioma. A: Cambio agrícola y ganadero de las unidades territoriales según biomas (colores). El cambio fue estimado a través del valor anualizado de la diferencia entre el valor final e inicial estimados ambos a partir de un modelo de regresión cúbica (ver Figura 4.1). B: Número de unidades territoriales según trayectoria y bioma. El tamaño del círculo es relativo al número de unidades territoriales y el color indica la trayectoria (mismos colores que la leyenda de la Figura 4.5). A su vez, los bloques de color gris sobre los encabezados de las filas y columnas representan la proporción de trayectoria o bioma, respectivamente.

El análisis de las trayectorias principales estuvo asociado a diversas variables biofísicas y humanas (Figura 4.7). Sin embargo, la baja precisión de la clasificación resultante del análisis discriminante (0.59 para un rango posible de 0 a 1) indica que no es posible asociar cada trayectoria principal a rangos específicos de las variables incluidas. El eje de las abscisas (x) explicó la mayor proporción de la variación (74%) y discriminó principalmente a las trayectorias principales II y IV. La trayectoria principal IV (incremento agrícola) fue predominante en unidades territoriales en las que (i) al inicio del período de estudio ya se había transformado una alta proporción de la vegetación natural en cultivos o pasturas, (ii) la topografía es relativamente plana y (iii) el clima templado. A su vez, la trayectoria principal II (incremento ganadero) ocurrió principalmente en unidades territoriales (i) inicialmente poco transformadas y (ii) con

topografía montañosa u ondulada. La trayectoria principal I (incremento conjunto) fue más frecuente en (i) regiones alejadas de los puertos de exportación, (ii) con elevados niveles de deforestación y (iii) con mayores precipitaciones. Finalmente, la trayectoria principal III (retracción) fue la que mayor dispersión presentó y pueden distinguirse en ella dos tipos de situaciones. Por un lado, se encuentran un conjunto de unidades dispersas, generalmente ubicadas en la periferia de toda la zona de estudio. Por otro, un conjunto de unidades territoriales muy aglomeradas que corresponden a un polo agroindustrial, con relativamente altos niveles de riqueza, ubicado al noroeste de la metrópolis de San Pablo.

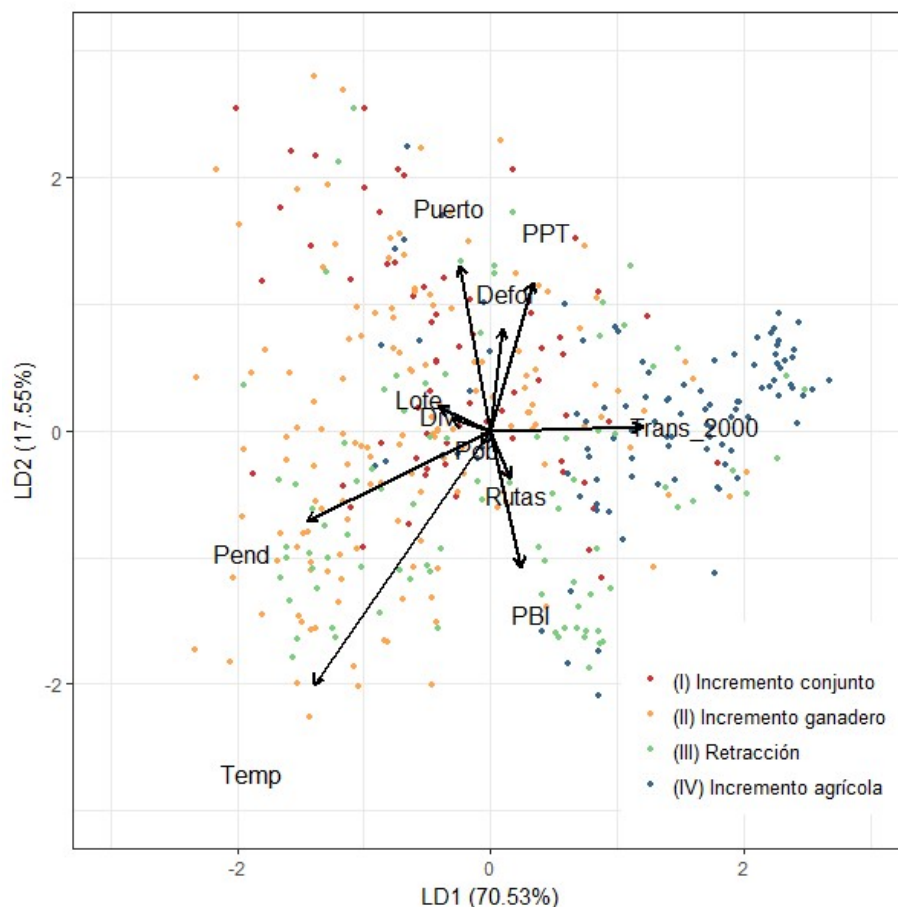


Figura 4.7. Análisis discriminante de las cuatro trayectorias principales. Los puntos representan las unidades territoriales, los números de los ejes el porcentaje de la variación explicada y los vectores la importancia relativa de cada una de las variables. En sentido horario, las variables son: distancia al puerto de exportación más cercano (Puerto), tasa media de deforestación anual (Defor), precipitación media anual (PPT), proporción de la superficie transformada en pastura o cultivo en el año 2000 (Trans_2000), densidad de rutas (Rutas), producto bruto interno per cápita (PBI), densidad de población (Pob), temperatura media anual (Temp), pendiente topográfica (Pend), cambio temporal en la diversidad de cultivos (Div) y tamaño medio de lote (Lote). El Cuadro Apéndice III.1 describe a las variables incluidas

El análisis de la descomposición aditiva de la producción agrícola a escala subnacional indica que existieron diferencias importantes entre regiones y tipos de trayectorias simples en cuanto al peso relativo de los componentes (área, rendimiento y composición) sobre el cambio en la producción (Figuras 4.8 y 4.9). Las unidades territoriales que experimentaron la trayectoria simple 1 (aumento conjunto de

agricultura y ganadería) son las que presentaron mayores incrementos en la producción, lo cual fue el resultado de cambios positivos en los tres componentes. El fuerte incremento productivo que impulsaron los cambios de composición de cultivos corresponde al aumento en la fracción sembrada con especies productivas (maíz y sorgo) en detrimento de una menos productivos (soja). Esto ocurrió en bosques, tanto estacionalmente secos como los del Chaco argentino, como húmedos del sur del Amazonas (Figura 4.9). La segunda trayectoria simple que mayores incrementos presentó fue la 4 (aumento agrícola con retracción ganadera), cuyo aumento estuvo determinado por incrementos tanto del área sembrada como en los rendimientos. Contrario a la trayectoria simple 1, la composición de cultivos en promedio contribuyó de forma negativa a la producción en este caso, como resultado del aumento de la fracción sembrada con soja en detrimento de la destinada a cereales (maíz y trigo). Estos cambios ocurrieron principalmente en pastizales y sabanas templadas y en los bosques estacionalmente secos del Chaco paraguayo (Figura 4.9). Las trayectorias simples 2, 3 y 6, que se caracterizaron por reducir su producción agrícola lo hicieron únicamente debido a reducciones en el área sembrada, pues los cambios en rendimiento y composición fueron mínimos.

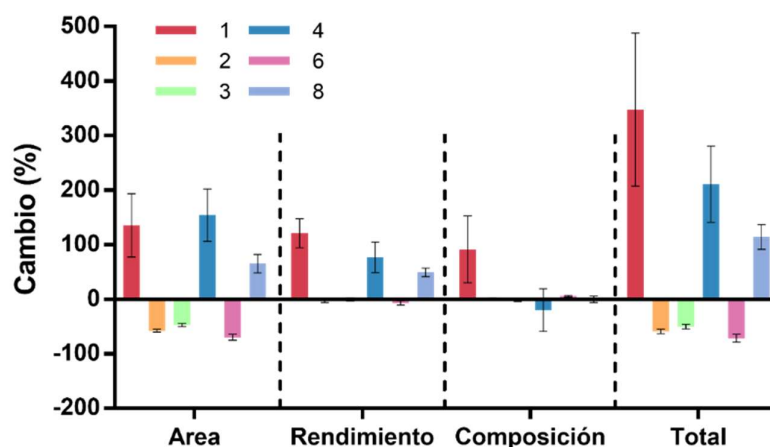


Figura 4.8. Cambios en la producción agrícola total y en sus componentes según trayectoria productiva simple. Las trayectorias productivas surgen de analizar conjuntamente la dinámica temporal de la agricultura y la ganadería. La trayectoria simple 1 representa un incremento conjunto de la agricultura y la ganadería. La trayectoria simple 4 representa un incremento de la agricultura y una disminución de la ganadería. La trayectoria simple 8 representa un incremento en la agricultura, mientras la ganadería no cambia. Las trayectorias simples 2, 3 y 6 representan una disminución en la agricultura combinadas con diferentes dinámicas de la ganadería. Los valores surgen de la descomposición aditiva de la producción, por lo cual la suma del cambio en área, rendimiento y composición es igual al cambio total. Para este análisis, los valores de producción de cada cultivo fueron convertidos a kilocalorías.

Durante el período analizado se observó una disminución de la diversidad de cultivos en la mitad de las unidades territoriales (Figura 4.10). Las unidades territoriales que presentaron aumentos importantes en la diversidad se encuentran tanto en áreas donde la producción agrícola es marginal (este de Brasil) como donde no lo es (centro-este de Argentina, este de Paraguay). Por el contrario, con escasas excepciones, las áreas de mayor producción agrícola (Pampas y Cerrado) tuvieron reducciones en la diversidad de cultivos extensivos. Estos cambios no estuvieron asociados a cambios en la producción (valor $p=0,76$), ni a sus componentes (Área, valor $p=0,73$; Rendimiento + cambio en composición, valor $p=0,98$).

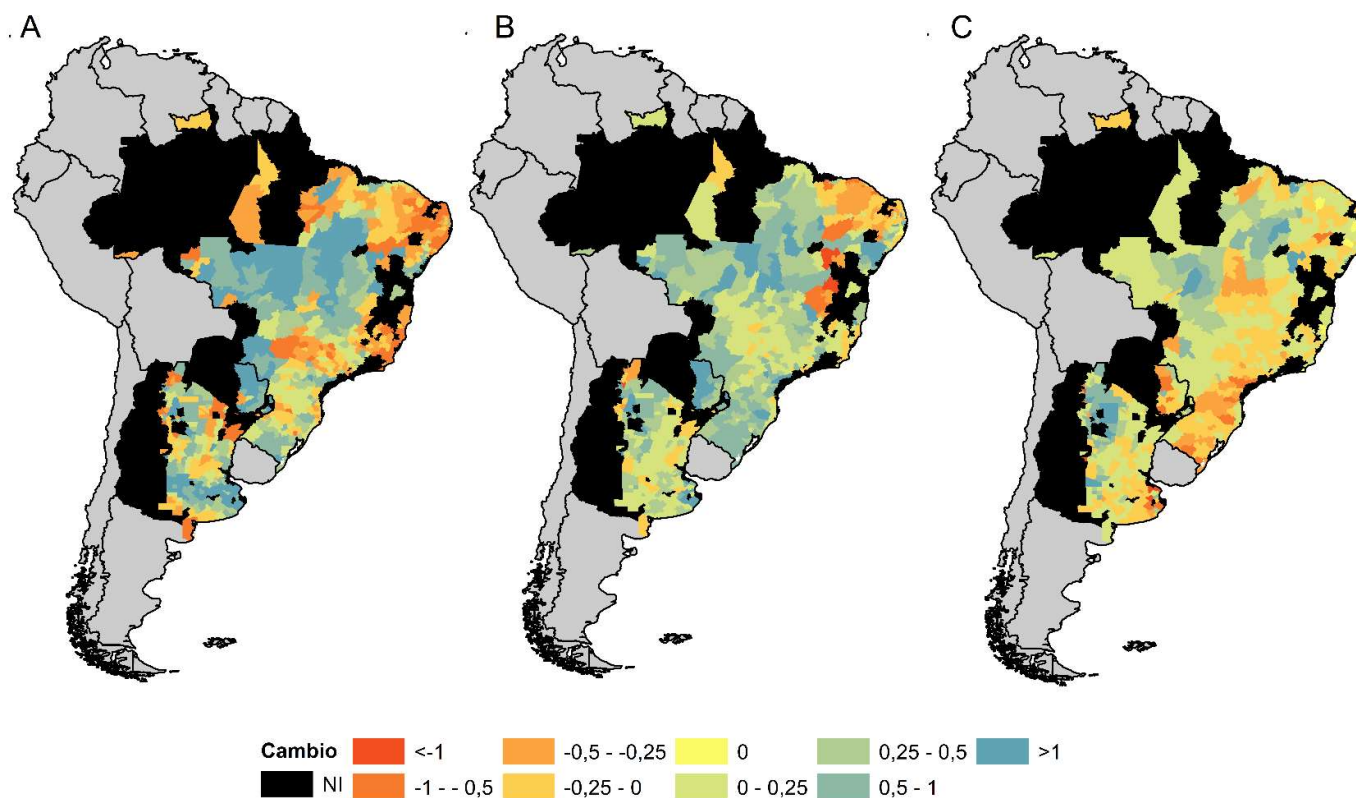


Figura 4.9. Cambios en la producción debido a variaciones en (A) área sembrada, (B) rendimientos, (C) composición de cultivos. Los valores surgen de la descomposición aditiva de la producción, por lo cual la suma del cambio en área, rendimiento y composición es igual al cambio total. Para este análisis, los valores de producción de cada cultivo fueron convertidos a kilocalorías. NI indica no incluido y refiere a aquellas unidades territoriales en las cuales al inicio (2002-2004) y/o fin (2013-2015) del período analizado no había niveles relevantes de agricultura.

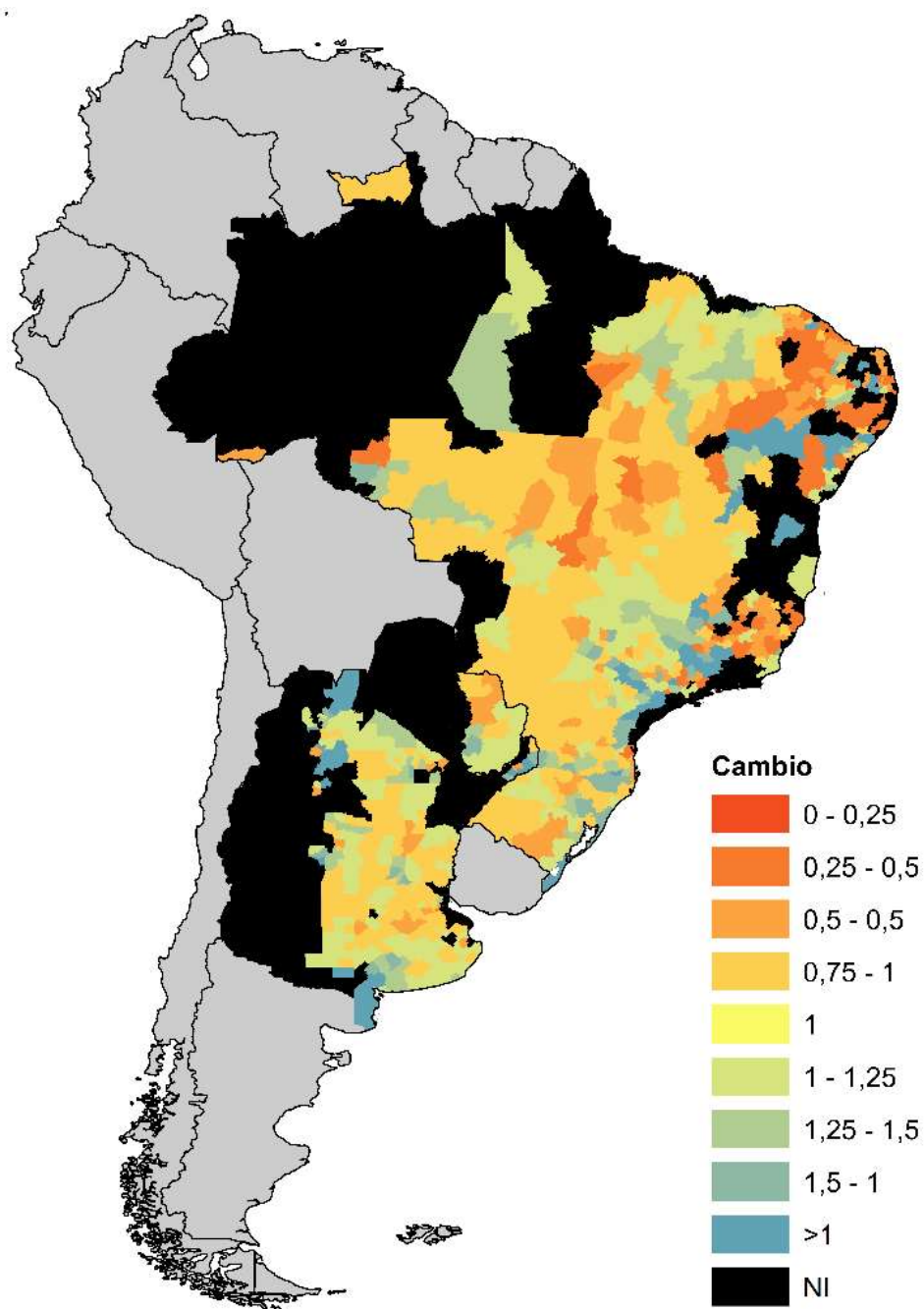


Figura 4.10. Cambios en la diversidad de cultivos extensivos entre inicio (2002-2004) y fin (2013-2015) del período analizado. NI indica no incluido y refiere a aquellas unidades territoriales en las cuales al inicio (2002-2004) y/o fin (2013-2015) del período analizado no había niveles relevantes de agricultura.

4.5. Discusión

Nuestros resultados indican que entre 2002 y 2015, la producción agrícola aumentó conjuntamente en los tres países un 74% como resultados de cambios en el área (+36%), rendimiento (+39%) y composición de cultivos (-1%). A su vez, las existencias de ganado vacuno aumentaron únicamente un 5%. En este período, la agricultura y la ganadería cambiaron poco sus niveles de concentración espacial. La agricultura tuvo un nivel de concentración mayor a la de la ganadería, puesto que el 50% de la producción fue explicada por el 12,3 y 18,1% de la superficie administrativa, respectivamente. Al analizar de forma conjunta la dinámica de la producción agrícola y ganadera, encontramos 9 trayectorias simples de cambio con un elevado nivel de agregación espacial. Algunas de ellas estuvieron fuertemente asociadas a ciertos biomas (ej. el aumento agrícola con retracción ganadera fue más común en pastizales y sabanas templadas) y determinadas variables biofísicas y humanas.

Sobre la base de trabajos y conocimiento previo, es posible asociar las cuatro trayectorias principales con cinco transiciones de uso de la tierra, o síndromes productivos (Figura 4.11). Los dos primeros síndromes (A y B) están asociados a la conversión, parcial o total, de la vegetación natural y conforman lo que algunos autores han denominado fronteras de *commodities* o neoliberales (Brannstrom 2009, Nolte et al. 2017). En la región y período analizado, estos síndromes se dan en situaciones en las cuales crece únicamente la ganadería (frontera ganadera) o cuando aumentan tanto la ganadería como la agricultura (frontera mixta). La frontera ganadera comprende únicamente la trayectoria simple 1, mientras que la frontera mixta comprende a las trayectorias simples 2 y 5 (Figura 4.5). En conjunto, las unidades territoriales que están involucradas en estos dos síndromes explican el 58% de la superficie administrativa del área de estudio (21% la frontera mixta y 37% la frontera ganadera). Estos síndromes no solo son los más importantes en cuanto a superficie, sino que también tienen la mayor representatividad y plasticidad puesto que se encuentran en todos los biomas y bajo condiciones humanas y biofísicas muy diversas (trayectorias principales I y II, Figura 4.7). Estos síndromes estuvieron fuertemente asociados a la pérdida de bosques bajo todo el gradiente hídrico de la región (semiáridas, subhúmedas y húmedas) incluyendo al Chaco, Cerrado, Mata Atlántica y Amazonas (Graesser et al. 2015).

El síndrome C corresponde al de agricultura consolidada e incluye las trayectorias simples 4 y 8, es decir, a aquellas unidades territoriales en las cuales la producción agrícola creció con o sin retracción ganadera, respectivamente (Figura 4.11). Este síndrome representó el 16% de la superficie administrativa y tuvo lugar fundamentalmente en áreas relativamente planas y de larga historia de uso agropecuario (trayectoria principal I, Figura 4.7), en las cuales se observó una reducción generalizada en la diversidad de cultivos extensivos (Figura 4.10). Estas áreas incluyen los pastizales y sabanas templadas de los pastizales del Río de la Plata y del Espinal, la porción sur del Cerrado y de la Mata Atlántica y el Bosque Paranaense en Brasil y Paraguay. A pesar de su participación secundaria en el área total de la zona de estudio, este síndrome concentra la mayor parte de su producción agrícola, y pese a que en ciertas zonas se redujeron las existencias de ganado bovino (ej. Pastizales del Río de la Plata), la densidad ganadera es aún muy alta (Figura 4.3). La existencia de este síndrome en la región pampeana argentina sugiere que la agricultura ha seguido desplazando a la ganadería, tal como ocurrió en los noventa (Paruelo et al. 2005) y algunos autores suponen que continuó ocurriendo en los últimos años (Vega et al. 2009).

Las trayectorias simples 3, 6 y 7, las cuales contemplan la retracción conjunta de ambas actividades, o de una sola sin cambio de la otra (Figura 4.5), comprenden dos situaciones diferentes que requieren división. Por un lado, existe un conjunto de unidades territoriales distribuidas en diferentes regiones que comprende fundamentalmente situaciones donde tuvieron lugar procesos de degradación o avances de la regulación del uso de la tierra orientadas a la conservación (Síndrome D). Ejemplos de degradación surgen en algunas de las unidades territoriales más periféricas del área de estudio en el sur de Argentina y el noreste de Brasil, en las cuales hubo intensas sequías durante la última década (Gabella y Strijker 2018, Marengo et al. 2017). A su vez, la disminución de la ganadería en el Amazonas probablemente sea una respuesta a las múltiples intervenciones orientadas a reducir la deforestación (Nepstad et al. 2014, le Polain de Waroux et al. 2017). Un caso muy distinto a los anteriores se observa en el aglomerado de unidades territoriales en el centro-sur de Brasil, en donde la misma trayectoria se puede explicar por el desplazamiento de ambas actividades por la expansión de cultivos no alimentarios (Síndrome E). Entre estos cultivos se encuentran especies forestales (eucaliptus y pinos) y caña de azúcar, qué si bien es utilizada como alimento, experimenta una fuerte expansión reciente traccionada por la producción de bioetanol (Martinelli et al. 2008, Lapola et al. 2010). Este síndrome tuvo lugar en una región de relativamente elevada riqueza económica (Figura 4.7) en la cual se encuentra la mayor conglomeración industrial de toda la región de estudio. Por lo cual, la presencia de industrias, sumado a la restricción de cultivo de caña de azúcar en el Amazonas (Lapola et al. 2014) explicarían la existencia de este foco que despliega un síndrome emergente de uso del territorio no visto aún en el resto de la región de estudio. Dado que la caña de azúcar se está expandiendo fuertemente en otras regiones de Brasil, monitorear los focos de expansión resulta de particular interés en las discusiones respecto al impacto del uso energético de la biomasa sobre la seguridad alimentaria (Spera et al. 2017). Es probable que una fracción de la agricultura realizada en unidades territoriales que sufrieron otros síndromes también estén desviando una porción creciente de su producción a biocombustibles derivados de soja y maíz. Sin embargo, la compleja trazabilidad del origen y destino de estos cultivos hace difícil atribuir la producción nacional de biocombustibles a las distintas unidades territoriales. Afortunadamente, surgen alternativas que buscan cubrir este vacío de información (<https://trase.earth/>, Gardner et al. 2018, Godar et al. 2015)

Las trayectorias productivas agrupadas en los dos síndromes anteriores podrían haber contemplado un tercer síndrome, el de transición forestal o ecológica (Barbier et al. 2010, Mather 1992). Esta transición ocurre cuando sistemas agropecuarios son abandonados y por sucesión ecológica retornan a ecosistemas seminaturales o secundarios. Algunos autores sugieren que esto podría haber ocurrido en algunas regiones del área estudiada (ej. Chaco seco argentino, Mata Atlántica, Baptista y Rudel 2009, Grau et al. 2008). Sin embargo, otros argumentan que si bien la deforestación ha disminuido en gran parte de la región (Graesser et al. 2015) esta transición no está ocurriendo (Ceddia 2016, Meyfroidt y Lambin 2011, Volante y Paruelo 2015) y una parte significativa de los incrementos recientes en la superficie de bosques (Aide et al. 2013) están asociados al aumento de plantaciones forestales (Curtis et al. 2018).

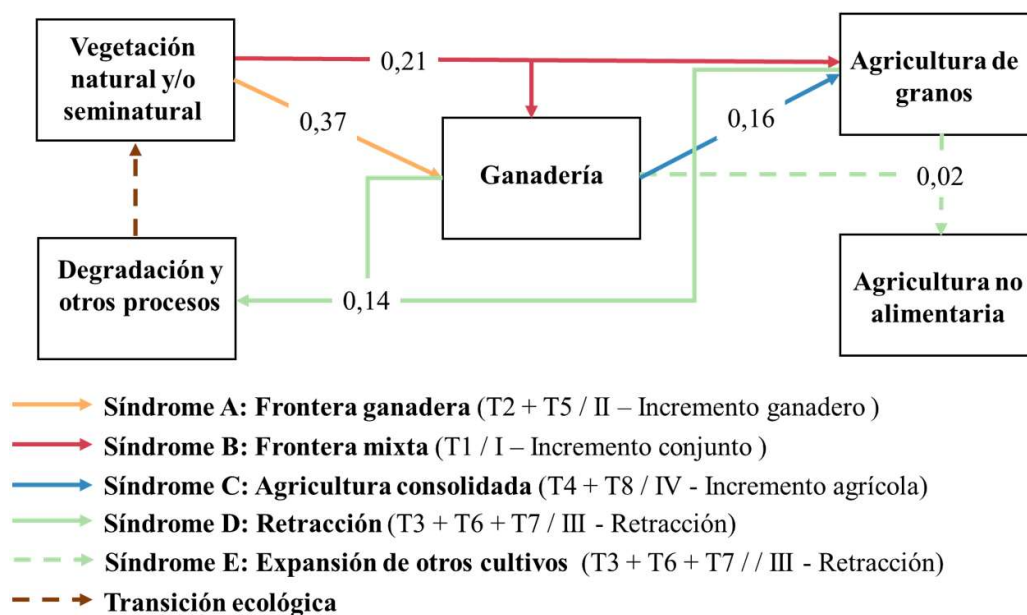


Figura 4.11. Esquema con los síndromes productivos de Argentina, Brasil para el período 2002-2015. Los síndromes productivos representan una agrupación de las trayectorias en base a conocimiento previo de la región. Los números indican la proporción de la superficie administrativa que representó cada síndrome productivo. Los síndromes se numeran con letras desde la A a la E y en cada caso se especifica a qué trayectorias simple (ej. T1) y principal (ej. I – Incremento conjunto) se asocia. Los colores de los síndromes coinciden con las trayectorias principales de las cuales se desprenden (Figura 4.7).

Los síndromes productivos caracterizados en los párrafos anteriores ponen en evidencia que, tal como indican otros trabajos (Graesser et al. 2015, Hansen et al. 2013), la región se caracteriza principalmente por continuar expandiendo su frontera agropecuaria a expensas de la conversión de ecosistemas naturales. A su vez, la existencia del síndrome 3 (la agricultura desplaza a la ganadería) en áreas con mayor historia de uso, lleva a la pregunta de si las unidades territoriales actualmente caracterizadas como de frontera (síndromes A y B) no son etapas tempranas del síndrome C. La región tiene similitudes con otras áreas de fronteras agropecuarias que ocurrieron en diferentes lugares del mundo a través de la historia, caracterizadas por la expansión, intensificación y desplazamiento de usos. Sin embargo, mientras las fronteras tradicionalmente se caracterizan por la conversión de áreas naturales debido a una presión demográfica local, las fronteras de la región analizada son principalmente impulsadas por la producción de *commodities* cuya demanda es distante y elástica en cuanto al precio (Meyfroidt et al. 2014, Meyfroidt et al. 2018). Por lo cual, si bien se ha intensificado la producción en la región, es necesario discernir este proceso de aquél que responde a cuestiones demográficas internas (Byerlee et al. 2014). La forma más común de intensificación a lo largo de la historia ha sido la descrita por Boserup (Boserup 1965, Ellis et al. 2013, Turner y Ali 1996). Esta se caracteriza por saltos tecnológicos que permiten aumentar la producción de alimentos, sin expandir el área cultivada, en un contexto de fuerte presión demográfica. A su vez, la intensificación de mercado se caracteriza por un reemplazo de actividades hacia aquellas que maximizan el beneficio económico.

La intensificación “boserupiana” generalmente se asocia a una menor presión sobre ecosistemas naturales y, potencialmente, deriva en una transición ecológica, es decir, en una recuperación de la vegetación natural en áreas menos productivas. Por el contrario, la intensificación de mercado comúnmente deriva en efecto rebote o en la

paradoja de Jevons, es decir en una mayor conversión de ecosistemas naturales (Lambin y Meyfroidt 2011, Pellegrini y Fernández 2018). Dado que la mayor parte de la producción en las áreas de frontera de la región es realizada por grandes productores capitalizados (Curtis et al. 2018, Graesser et al. 2018) y destinada a mercados distantes, el retrocontrol demográfico está ausente. Por ende, es esperable que la intensificación determine mayor conversión. Sin embargo, estos procesos son altamente dependientes del contexto económico (ej. precios de los *commodities*) y político local (ej. políticas públicas de conservación y producción) y global (políticas de intercambio comercial) y, también, de otros factores de producción además de la tierra (Meyfroidt et al. 2018). El monitoreo de las fronteras agropecuarias de la región, junto a estudios que describan el proceso de toma de decisiones de los productores que reemplazan los ecosistemas naturales, deberían ser una prioridad en las agendas científicas y políticas de los países de la región.

Tanto al inicio como al final del período analizado, la producción agrícola y las existencias de ganado bovino estuvieron fuertemente concentradas en el espacio, aunque la agricultura exhibió mayores niveles de concentración que la ganadería. El bajo cambio temporal en los niveles de concentración espacial de ambas actividades sugiere que, si bien las dos se expandieron territorialmente, esta expansión fue acompañada por una intensificación en los aglomerados altamente productivos preexistentes. La mayor concentración de la agricultura respecto a la ganadería podría responder a diversos factores. Por un lado, la ganadería generalmente tiene requerimientos ambientales menos exigentes que la agricultura, pudiendo, por ejemplo, realizarse en áreas con menores precipitaciones y mayores pendientes. A su vez, la agricultura de exportación de la región generalmente se encuentra más concentrada debido a aspectos logísticos relacionados al acceso a insumos y mercados (ej. agroquímicos, maquinaria, centros de acopios y puertos), lo que da lugar a un ciclo de retroalimentación (Garrett et al. 2014, Gasparri et al. 2015). Finalmente, la agricultura y la ganadería tienden actualmente hacia un desacople espacial, es decir, en sitios donde antes coexistían en sistemas mixtos, la agricultura desplaza a la ganadería. Por lo cual, el desacople y desplazamiento entre la agricultura y la ganadería, sumado a la tendencia a la aglomeración de la agricultura, la amplitud de condiciones de condiciones bajo la cual puede realizarse la ganadería en un contexto de abundancia de tierra está configurando un escenario territorial caracterizado por escasos focos agrícolas altamente productivos y especializados, y una ganadería dispersa que aún cuenta con pocos incentivos para intensificarse.

Los resultados discutidos en el párrafo anterior tienen relevancia para el debate de *land sharing* y *land sparing*, es decir, respecto a los arreglos espaciales que permitan conciliar la producción de alimentos y la conservación de la biodiversidad (Fischer et al. 2008, Green et al. 2005, Kremen 2015). El elevado nivel de concentración de ambas actividades sugiere que existe una fracción importante de las unidades administrativas poseen niveles de producción y productividad muy bajos. Algunos autores sugieren que una alternativa es convertir estas regiones, generalmente ocupadas por sistemas de producción de autoconsumo, en áreas de conservación e intensificar la agricultura en las regiones más productivas (Aide y Grau 2004, Grau et al. 2008, Phalan et al. 2008). Otros proponen que estos sistemas de producción de baja productividad son compatibles con la conservación de la naturaleza y, aunque sus niveles de producción sean bajos, reducen la probabilidad de que sean convertidos a sistemas incompatibles con la conservación (Aguiar et al. enviado). Sin embargo, esta discusión es altamente dependiente de qué, cómo y cuánto se produce y también de las especies y ecosistemas

que se quieren conservar (Fischer et al. 2014, Romer-Muñoz et al. 2018). Aunque existen trabajos que evaluaron estas cuestiones en el área de estudio (ej. Macchi et al. 2013, Mahood et al. 2012, Mastrángelo et al. 2012, ver Kremen 2015 para una síntesis), la mayor parte de ellos fueron realizados a la escala de paisaje. Este trabajo, lejos de resolver este debate, podría habilitar una discusión más amplia al proveer información a una escala espacial mayor, y por lo tanto útil para discutir la conservación a nivel nacional o de ecoregión.

La región estudiada fue una de las que mayores cambios en el uso de la tierra atravesó a nivel global desde principios del siglo XXI (Graesser et al. 2015, Hansen et al. 2013, Ramankutty et al. 2018). Aunque tasas de cambio de similar magnitud tuvieron lugar en la región en el pasado (Figura Apéndice III.2), el período actual se caracteriza por un fuerte avance de la producción agropecuaria sobre ecosistemas más frágiles. A su vez, el efecto acumulativo de los cambios en el uso de la tierra, junto a una sociedad local y global más informada y preocupada por las consecuencias sociales y ambientales de estos cambios, hacen a este período distinto a los anteriores. Trabajos recientes indican que la conversión de ecosistemas naturales se ha reducido en la mayor parte del área de estudio (Graesser et al. 2015). Sin embargo, las tasas aún continúan siendo elevadas (Meyfroidt y Lambin 2011). En qué medida estas reducciones se deben a intervenciones como las leyes de ordenamiento territorial aún está en discusión en la comunidad científica (Aguiar et al. 2018, Brancaillon et al. 2016). La dudosa efectividad de estas intervenciones y el hecho de que la región alberga una de las pocas reservas de tierras cultivables aún no cultivadas a nivel global (Lambin et al. 2013) sugieren que las fronteras agrícolas pueden estar más sujetas a expansión que a estabilización.

4.6. Conclusiones

Los resultados de este trabajo sugieren que mientras la producción agrícola creció fuertemente en los tres países en el período analizado, la ganadería lo hizo en menor medida. Se encontraron niveles altos de concentración espacial que cambiaron poco en el tiempo. La distribución espacial de las actividades, y sus cambios en el tiempo, sugieren que la organización territorial de la producción agropecuaria está caracterizada por escasos focos agrícolas altamente productivos y especializados, y una ganadería dispersa que aún cuenta con pocos incentivos para intensificarse. Se describieron 5 síndromes productivos o transiciones de uso de la tierra que, a nuestro saber, son el primer intento por describir cambios conjuntos en la agricultura y la ganadería en los principales países exportadores de alimentos de Sudamérica. En conjunto, los resultados y conclusiones presentados aquí presentan las limitaciones propias de la información censal utilizada, y el intento de esbozar procesos complejos como los descriptos aquí puede resultar ambicioso e incompleto. Sin embargo, la necesidad urgente de comprender las transformaciones territoriales y sus consecuencias productivas y ambientales avivan el interés por una síntesis de este tipo, que puede ayudar a diseñar acciones políticas más inteligentes, justas y efectivas.

Capítulo 5

Discusión general

5. Capítulo 5: Discusión general

En esta tesis se describieron los patrones y tendencias de la diversidad de la producción agrícola mundial y la del principal foco exportador de productos agropecuarios de Sudamérica, constituido por Argentina, Brasil y Paraguay. La aproximación metodológica involucró principalmente la construcción y análisis de bases de datos espaciales y temporales derivadas de diferentes fuentes. En este capítulo se presenta una síntesis de los principales resultados de cada capítulo y se discuten sus aportes novedosos a la luz del conocimiento actual, por un lado, y en cuanto a sus implicancias para la toma de decisiones, por el otro. A su vez, se plantean nuevos interrogantes que podrían guiar estudios futuros. Finalmente, se discuten las principales conclusiones en el contexto de las motivaciones que dieron origen a esta tesis.

5.1. Síntesis de los principales resultados

En el **capítulo 2** se describieron las tendencias espaciales y temporales de la diversidad de cultivos producidos, consumidos, importados y exportados a escala global durante los últimos 50 años (1961-2013). Los resultados principales fueron:

A nivel de país individual, el consumo de cultivos se diversificó a una tasa mayor que la de su producción gracias a la creciente magnitud y diversificación del intercambio entre países, particularmente la de las importaciones, que fue mayor a la de las exportaciones:

- Tanto para el consumo como para la producción, la composición de cultivos convergió entre países, no obstante, lo hizo más rápidamente para el consumo que para la producción.
- La mayoría de los cultivos aumentaron conjuntamente su expansión geográfica respecto a su consumo y producción, aunque tuvieron lugar algunas trayectorias singulares, particularmente aquellas de la soja y la palma aceitera.

En el **capítulo 3** se describieron los patrones de la diversidad de cultivos a escala global y se analizó su asociación con diversos factores biofísicos y humanos. Los principales resultados de este capítulo fueron:

- La diversidad de cultivos no coincide con el patrón latitudinal descripto para plantas vasculares silvestres ya que la diversidad de cultivos fue alta tanto en regiones templadas como tropicales
- El principal patrón geográfico de la diversidad de cultivos muestra que el Viejo Mundo (Europa, África y Asia) es generalmente más diverso que el Nuevo Mundo (América y Oceanía).
- Se puede relacionar el patrón geográfico anterior a dos contingencias históricas: la Revolución Neolítica (origen de la agricultura) y el Intercambio Colombino
- En ambas regiones, la diversidad fue mayor en áreas relativamente áridas, en sitios con elevada fertilización nitrogenada (sintética y orgánica) y en áreas en las que la fracción cultivada del territorio es baja.

En el **capítulo 4** se analizó la dinámica y distribución de la producción de granos y de las existencias de ganado vacuno en Argentina, Brasil y Paraguay entre los años 2002 y 2015. Los principales resultados de este capítulo fueron:

- La producción agrícola de cultivos extensivos aumentó conjuntamente en los tres países un 74% como resultados de cambios en el área (+36%) y rendimiento (+39%) y mínimamente afectada por cambios en la composición de cultivos (-1%). En el mismo período las existencias de ganado vacuno aumentaron únicamente un 5%.
- La agricultura y la ganadería cambiaron poco sus niveles de concentración espacial. La agricultura tuvo un nivel de concentración mayor a la de la ganadería, puesto que el 50% de la producción fue explicada por el 12,3 y 18,1% de la superficie administrativa, respectivamente.
- Al analizar de forma conjunta la dinámica de la producción agrícola y ganadera, se describieron 9 trayectorias de cambio con un elevado nivel de agregación espacial. Algunas de ellas estuvieron fuertemente asociadas a ciertos biomas (ej. el aumento agrícola con retracción ganadera fue más común en pastizales y sabanas templadas) y determinadas variables biofísicas y humanas.
- Las trayectorias productivas fueron agrupadas, en base a trabajos y conocimiento previo, en 5 síndromes o transiciones de uso de la tierra. En cuanto a la superficie administrativa que representan, los síndromes principales en la región actualmente son los de Frontera Ganadera y Frontera Mixta, los que en conjunto explican aproximadamente la mitad de la superficie.

5.2. Relevancia de los resultados y nuevos interrogantes para estudios futuros

5.2.1. ¿Qué ocurrió con la diversidad de la producción agrícola?

En un mundo en el que la agricultura aún se expande, la diversidad de lo que se produce en el territorio (nivel país) ha cambiado poco y el consumo se ha diversificado principalmente debido a un intercambio global de mayor magnitud y diversidad. La diversidad de especies cultivadas actual, además de ser órdenes de magnitud menor que la de plantas silvestres, muestra patrones geográficos globales muy distintos. Lejos de reproducir patrones biogeográficos naturales como la relación diversidad-latitud, la diversidad de especies cultivadas parece guardar un legado histórico asociado, en primer lugar, a los centros de domesticación primaria y secundaria de los cultivos y, luego, al intercambio asimétrico de cultivos durante la expansión colonial de Europa. En conjunto, estas contingencias históricas determinaron que actualmente, el Viejo Mundo (África, Asia y Europa) es generalmente más diverso que el Nuevo Mundo (América y Oceanía).

En un mundo donde crece el desacople espacial entre la producción y el consumo de alimentos, resulta particularmente importante describir que ha pasado con la diversidad en el uso del territorio en aquellos focos globales en los cuales la producción es destinada fuertemente a satisfacer demandas distantes. Argentina, Brasil y Paraguay representan uno de estos focos globales. Desde comienzos del siglo XXI, la producción de granos de los tres países aumentó fuertemente. Por el contrario, la ganadería creció relativamente poco, pero experimentó una fuerte expansión sobre ecosistemas naturales. Esta expansión se debió parcialmente a un desplazamiento

traccionado por el avance de la agricultura en los núcleos más productivos y con mayor historia de uso agropecuario.

5.2.2. Otras contribuciones relevantes a la luz del conocimiento previo

A la luz del conocimiento previo, el primer capítulo determinó que la diversificación (a nivel de país) y la homogenización (entre países) de las dietas reportada en un trabajo previo (Khoury et al. 2014) se debió principalmente al incremento y diversificación del intercambio global de cultivos y, en menor medida, a la diversificación de la producción a nivel de país. Asociado a esto, la homogenización fue mayor para el consumo que para la producción, es decir, los países se parecen más en lo que consumen que en lo que producen. El hecho de que la producción también se haya homogenizado indica que las plantas cultivadas podrían ofrecer un ejemplo más de la homogenización de la biota que se ha documentado recientemente para especies de plantas silvestres (Dornelas et al. 2014, Khoury et al. 2016, Vellend et al. 2017). A su vez, la menor homogenización de la producción de cultivos respecto al consumo podría ser el resultado de las restricciones biofísicas que aún impone el ambiente.

El comercio internacional permite balancear la oferta y demanda global de alimentos pues ambas crecen a diferentes tasas en distintas regiones del mundo. Por lo cual, el comercio internacional permite potencialmente incrementar el acceso a los alimentos en países cuya demanda supera la oferta de alimentos local (Godfray et al. 2010, Wood et al. 2018). A su vez, los resultados de esta tesis sugieren que el comercio internacional también incrementa el acceso a una canasta más variada de cultivos. En este contexto, algunos autores sugieren que políticas proteccionistas que limiten el comercio de alimentos tendrían efectos negativos en la seguridad alimentaria, principalmente en países pobres (Wood et al. 2018). Sin embargo, el comercio internacional tiene numerosas consecuencias ambientales y sociales que generalmente se asocian a una distribución asimétrica de costos y beneficios entre países productores y consumidores (Erb et al. 2009, Hornborg 1998). Entre las principales consecuencias ambientales negativas del comercio internacional se encuentran el incremento de las emisiones de gases con efecto invernadero (Dalín y Rodríguez-Iturbe 2016), la apertura y desacople espacial de los ciclos de nutrientes (Billen et al. 2014, Schipanski y Bennett 2012) y las pérdidas de biodiversidad (Chaudhary y Kastner 2016), entre otros. A su vez, el acceso a una canasta más diversa de cultivos en ciertas regiones del mundo podría tener consecuencias sociales negativas en aquellas áreas donde los cultivos son el alimento básico de la dieta, puesto que las exportaciones aumentan los precios locales (Trolío et al. 2016). Por lo tanto, uno de los grandes desafíos que presenta actualmente el sistema global agroalimentario, es el diseño de una red de comercio más eficiente, equitativa y ambientalmente sustentable. Aunque hay ciertos trabajos que apuntan en este sentido (McDonald et al. 2015, Schipanski et al. 2016, Torreggiani et al. 2018), quedan muchos aspectos por explorar y mejorar.

A escala global, la diversidad de cultivos producidos no coincidió con el gradiente latitudinal descrito para las plantas vasculares silvestres (Kreft & Jetz 2006). En cambio, contrario a lo que han reportado otros autores que utilizaron datos a nivel de país (Nelson et al. 2016), el uso de información espacialmente más detallada mostró que la diversidad de cultivos actualmente es elevada tanto en regiones templadas como tropicales. El principal patrón geográfico global de la diversidad de cultivos refleja importantes diferencias entre el Viejo (África, Europa y Asia) y el Nuevo (América y Oceanía) mundo. Por un lado, esta diferencia es atribuible al hecho de que una

proporción mayor de los cultivos fueron originados o domesticados en el Viejo Mundo (Price y Bar-Yosef 2011). Por otro, el Intercambio Colombino que tuvo lugar desde fines del siglo XV generó una redistribución asimétrica de cultivos a escala global. Esta redistribución permitió enriquecer la canasta de cultivos producidos y consumidos en el Viejo Mundo y, si bien, la diversidad de cultivos en algunos sistemas agrícolas americanos precolombinos creció, esto fue contrarrestado por la expansión simultánea de una agricultura colonial fuertemente basada en cultivos foráneos orientados a la exportación (ej. bananas, trigo, caña de azúcar, Arnold 1996, Mann 2011). Aún después de más 400 años de expansión agrícola en el Nuevo Mundo, sus principales cinturones agrícolas continúan siendo poco diversos y dedicados principalmente al cultivo de cereales y oleaginosas (Ramankutty et al. 2018). Posteriormente, la Revolución Industrial y la Revolución Verde parecen haber acentuado las diferencias previas entre el Viejo y el Nuevo Mundo. Los resultados obtenidos sugieren que la importancia relativa y la magnitud del efecto de algunos de los determinantes fue similar entre regiones, mientras que otros fueron diferentes. En general, la diversidad es mayor en áreas relativamente áridas, en sitios con elevada fertilización nitrogenada (sintética y orgánica) y en los cuales la fracción cultivada del territorio es baja.

Los capítulos 2 y 3 se enfocan en la diversidad agrícola a nivel de especie y escala global. Por el contrario, una fracción importante de los trabajos que describen la diversidad agrícola se concentran en las variedades de los cultivos, o de sus ancestros no domesticados (ej. Castañeda-Álvarez et al. 2016, Jarvis et al. 2008). A su vez, recientemente ha crecido el interés por la diversidad de usos a escala de paisaje en el contexto del estudio y fomento de paisajes multifuncionales (Garibaldi et al. 2017, Mastrángelo et al. 2014). Por lo cual, si bien la diversidad agrícola ha tomado relevancia en las agendas científicas y políticas en los últimos años (IPES 2016, Zimmerer y de Haan 2017), actualmente se requieren marcos conceptuales que unifiquen las diferentes perspectivas, disciplinas, niveles de organización biológica y social, y escalas espaciales y temporales. Una de las alternativas posibles podría ser la adaptación marcos conceptuales provenientes de diferentes disciplinas, tal como la biología de la conservación (Noss et al. 1990). A su vez, resulta necesario enriquecer análisis como este con la descripción de los patrones y determinantes de otras dimensiones fundamentales de la conservación de especies, tal como los endemismos y la probabilidad de extinción local (nivel de amenaza).

Los capítulos 2 y 3 también comparten la relevancia que ha tenido la redistribución de las especies de cultivos a lo largo de la historia de la humanidad en cuanto a homogeneizar la producción y el consumo. Aunque los resultados de esta tesis sugieren que la producción no se ha homogenizado tanto como el consumo, es importante remarcar que actualmente 70% de la producción a escala global es explicada por cultivos provenientes de centros de domesticación distantes (Khoury et al. 2016). Resulta necesario una descripción exhaustiva de los efectos positivos y negativos asociados a la homogenización de las dietas y la producción. A su vez, la construcción de escenarios dietarios y productivos futuros podría ser un camino interesante para transitar en cuanto al diseño de un sistema agroalimentario más sustentable. Aunque existen estudios que describen posibles escenarios dietarios (ej. Kastner et al. 2012), o del efecto del cambio climático sobre los cultivos (ej. Burke et al. 2008), resta incluir otros forzantes. Entre estos forzantes deberían incluirse: (i) cambios culturales, la probable expansión de una agricultura fuertemente basada en insumos (ej. riego, maquinaria, agroquímicos) y, por ende, menos dependiente del ambiente, (ii) el mejoramiento genético de los cultivos que potencialmente permite expandir las áreas

donde pueden ser cultivados y (iii) el posible reemplazo de cultivos tradicionales (ej. mijo y sorgo) por cultivos más cosmopolitas (ej. maíz), y (iv) diferente aplicación de políticas proteccionistas que limiten el intercambio entre países.

Al analizar la diversidad del uso del territorio de uno de los principales focos exportadores de alimento del Nuevo Mundo (Argentina, Brasil y Paraguay) se encontró que, desde comienzos del siglo XXI, la producción agrícola creció fuertemente mientras que la ganadería lo hizo en mucha menor medida. La distribución espacial de los cambios observados fue similar a lo reportado por un análisis a escala continental enfocado en los cambios en el área dedicada a cada actividad (Graesser et al. 2015). A futuro, resultaría interesante complementar dichos resultados con los derivados de este trabajo, y avanzar en una mejor caracterización de los demás factores que determinan la producción además del área. En este contexto, los resultados de esta tesis sugieren que los cambios en la producción se deben principalmente a variaciones en los rendimientos y la superficie cultivada de los cultivos, mientras los cambios en su composición tuvieron un efecto menor. A futuro, resultaría interesante distinguir, un cuarto componente de la producción, la intensidad en el uso de la tierra, es decir, cuantas cosechas anuales se realizan sobre una misma porción de tierra (Izumi y Ramankutty 2015). Esto requeriría identificar los cultivos a nivel de lote en grandes escalas de extensión, cosa que aún no está totalmente resuelta mediante el uso de sensores remotos. Finalmente, resulta fundamental avanzar hacia un análisis de descomposición aditiva para la ganadería tal como se hizo aquí con la agricultura.

El análisis conjunto de la dinámica temporal de la agricultura y la ganadería en Argentina, Brasil y Paraguay permitió caracterizar síndromes o transiciones en el uso de la tierra. Ciertas regiones de estos países compartieron síndromes productivos similares, entre los cuales los principales fueron la expansión conjunta de ambas actividades (Frontera mixta) o únicamente de la ganadería (Frontera ganadera). Sin embargo, existieron ciertas diferencias entre biomas y países que sugieren que no existe una trayectoria única para toda la región. Por ejemplo, únicamente en Brasil tuvo lugar un síndrome productivo novedoso que se caracteriza por una retracción conjunta de la agricultura y de la ganadería y una expansión de cultivos agrícolas no alimentarios, tales como la caña de azúcar para bioetanol o la forestación de pinos y eucaliptus (Lapola et al. 2011, Martinelli et al. 2008). Estudios recientes indican que este nuevo uso del territorio podría estar expandiéndose en el Estado de Goiás (Spera et al. 2017), por lo cual la expansión de estos focos o la aparición de nuevos resulta una cuestión especialmente importante para el sistema alimentario global y para la dinámica territorial local. En este contexto, resulta ineludible una caracterización similar de trayectorias de uso de la tierra para otras fronteras agropecuarias, actuales y pasadas. Esto permitiría, por un lado, mejorar la comprensión de estos fenómenos y, por otro, diseñar formas más efectivas de estabilización de las fronteras y más equitativas en cuanto a la distribución de costos y beneficios entre los distintos actores sociales.

Finalmente, en la región analizada, la agricultura y la ganadería tienden actualmente hacia un desacople espacial, es decir, en sitios donde antes coexistían en sistemas mixtos, la agricultura desplaza a la ganadería. Por lo cual, el desacople y desplazamiento entre la agricultura y la ganadería, sumado a, por un lado, la tendencia a la aglomeración de la agricultura y, por otro, a la amplitud de condiciones de condiciones bajo la cual puede realizarse la ganadería en un contexto de abundancia de tierra, está configurando un escenario territorial caracterizado por escasos focos agrícolas altamente productivos y especializados, y una ganadería dispersa que aún

cuenta con pocos incentivos para intensificarse. En este contexto, para reducir la deforestación resulta clave evaluar las ventajas y desventajas de dos trayectorias posibles, que son la expansión de baja intensidad sobre bosques o la intensificación sobre pasturas con sistemas más eficientes (Rueda et al. 2013).

5.3. Relevancia de los resultados para la toma de decisiones

Algunas de las problemáticas globales y regionales tratadas en esta tesis han incentivado intervenciones regulatorias del uso de la tierra y de las cadenas de valor. Este trabajo identificó una serie de beneficios y perjuicios asociados al comercio internacional, que, junto a otros discutidos en otros trabajos, podrían ser utilizados para diseñar e implementar una red global de intercambio más sustentable. Es decir, el diseño e implementación de un sistema internacional de intercambio más virtuoso respecto a criterios ambientales y sociales más allá de los económicos que actualmente se priorizan. Sin embargo, el carácter no vinculante de los acuerdos internacionales respecto al ambiente, junto a la relativa anarquía de la política internacional ambiental (Vatn 2015) hacen que las decisiones sean lentas (Scheffer et al. 2003) y en muchos casos ineficaces. Para cubrir estas falencias y complementar los instrumentos ya existentes, han surgido otro tipo de herramientas orientadas a intervenir en las cadenas de valor de los productos (ej. soja y palma de aceite, Lambin y Thorlakson 2018, Lambin et al 2018). Dado que los consumidores en ciertos lugares del mundo cada vez tienen mayor conocimiento de los problemas ambientales que generan sus preferencias de consumo, es esperable que las intervenciones en las cadenas de valor continúen expandiéndose.

Los países de Sudamérica que han sido el foco de la última parte de esta tesis también han sido el foco de múltiples intervenciones, principalmente para reducir la deforestación (Nolte et al. 2017). Aunque la deforestación se ha reducido en la región (Graesser et al. 2015), no existen fuertes evidencias de que esto se haya debido a un buen diseño e implementación de estas estrategias (Aguiar et al. 2018, Brancaillon et al. 2017). Sin embargo, existen evidencias de que la fuerte reducción de la deforestación en el Amazonas brasileiro desde comienzos del siglo XXI ha sido el resultado de múltiples estrategias y medidas de control, entre ellas leyes estatales e intervenciones en las cadenas de valor de la soja y la ganadería (Nepstad et al. 2014). Los resultados de esta tesis muestran hay determinados síndromes de uso de la tierra comunes entre países, y otros trabajos sugieren que, en muchos casos, las fronteras están traccionadas por actores similares que operan transnacionalmente (Gasparri y le Polain de Waroux 2015, le Polain de Waroux et al. 2016). Por lo cual, resulta indispensable cierta coordinación entre países en cuanto a sus políticas de control del uso de la tierra, de lo contrario existe la posibilidad de fuga y desplazamiento de actividades hacia regiones donde no hay regulaciones o su cumplimiento es bajo (le Polain de Waroux et al. 2018). Finalmente, la diversidad del uso de la tierra ha recibido poca atención en las agendas políticas de la región. Actualmente, en Argentina surgió un proyecto de ley en este sentido, el cual busca promover una diversificación de los ambientes cultivados (Sobre la Tierra, 2018).

Finalmente, las consecuencias sociales y ambientales de los cambios en el uso de la tierra pueden ser enmarcados dentro de lo que se conoce como problemas de acción colectiva (Nyborg et al. 2016, Ostrom 2000). Estos problemas surgen cuando la resolución de un problema o conflicto (ej. pérdida de diversidad agrícola, deforestación) requieren de la acción coordinada de múltiples actores sociales. Además de las

intervenciones estatales o de mercado que se discutieron en los párrafos anteriores, estos problemas también se resuelven a través de la modificación de normas o conductas sociales (Nyborg et al. 2016). En este contexto, resulta indispensable una mayor educación orientada a enseñar como las decisiones de consumo (ej. dietas) no solo tienen consecuencias directas sobre la salud, sino también sobre el medioambiente y comunidades locales de los sitios en los cuales se produjeron los productos. Independientemente de las estrategias empleadas, la resolución de problemas de acción colectiva requiere, para empezar, de la identificación de un problema u objetivo común. Actualmente, no hay consensos entre los actores sociales respecto a las consecuencias sociales y ambientales de los cambios en el uso de la tierra. Por lo cual, en situaciones como estas lo ideal es (i) diversificar las estrategias, (ii) intentar que estén basadas en conocimiento científico (Saltelli & Giampietro 2017) y (iii) evitar la discusión dicotómica (*land sharing* vs. *land sparing*, agroecología vs. intensificación sustentable) ya que probablemente el éxito de las estrategias es condicional al contexto al que se aplican.

5.4. Consideraciones finales

El gran desafío que originó esta tesis fue cómo lograr la seguridad alimentaria en el futuro con los menores impactos ambientales posibles y de una forma socialmente equitativa. Dada la complejidad del tema, la tesis abordó un área relativamente poco explorada en la literatura, que es la diversidad de la producción agrícola. Dada la magnitud del fenómeno, la aproximación metodológica consistió fundamentalmente en la construcción y análisis de bases de datos. Aproximaciones diferentes (ej. experimentos, encuestas) resultan prácticamente imposibles a esta escala espacial y en el marco de un doctorado. Debido a ello, una fracción importante del análisis está basado en análisis correlativos que, si bien no implican causalidad, permiten hacer inferencias y especulaciones a la luz del conocimiento previo con mayor robustez. En conjunto, los resultados y conclusiones presentados aquí comprenden las limitaciones propias de la información y aproximación utilizada y el intento de esbozar procesos complejos, como los descritos aquí, puede resultar ambicioso e incompleto. Sin embargo, la necesidad urgente de comprender los fenómenos abordados, avivaron el interés por este tipo de síntesis, capaz de contribuir a diseñar acciones políticas más efectivas y equitativas. En algunos casos el diseño de estas políticas no requiere de mayor conocimiento científico sino de la aplicación de existente. Sin embargo, un programa de investigación futuro, con múltiples escalas de análisis, aproximaciones analíticas y disciplinarias, que articule la investigación con las demandas de la sociedad resulta un camino promisorio para el diseño de estas políticas.

7. Bibliografía

- Aguiar, S., Mastrangelo, M.E., Texeira, M., Meyfroidt, P., Volante, J.N., & Paruelo, J.M. Economic infrastructures and institutions mediate the effects of biophysical drivers of forest cover change in the Dry Chaco. *Enviado a Environmental Research Letters*
- Aguiar, S., Mastrangelo, M. E., Collazo, M. A. G., Sans, G. H. C., Mosso, C. E., Ciuffoli, L., ... & Cáceres, D. (2018). ¿Cuál es la situación de la Ley de Bosques en la Región Chaqueña a diez años de su sanción? Revisar su pasado para discutir su futuro. *Ecología Austral*, 28(2), 400-417.
- Aguilar, J., Gramig, G. G., Hendrickson, J. R., Archer, D. W., Forcella, F., & Liebigh, M. A. (2015). Crop species diversity changes in the United States: 1978–2012. *PloS One*, 10(8), e0136580.
- Aide, T. M., & Grau, H. R. (2004). Globalization, migration, and Latin American ecosystems.
- Aide, T. M., Clark, M. L., Grau, H. R., López-Carr, D., Levy, M. A., Redo, D., ... & Muñiz, M. (2013). Deforestation and Reforestation of Latin America and the Caribbean (2001–2010). *Biotropica*, 45(2), 262-271.
- Aizen, M. A., Garibaldi, L. A., Cunningham, S. A. y Klein, A. M. (2009). How much does agriculture depend on pollinators? Lessons from long-term trends in crop production. *Annals of Botany*, 103(9), 1579-1588.
- Alene, A. D., Abdoulaye, T., Rusike, J., Manyong, V. and Walker, T. S. (2015) ‘The effectiveness of crop improvement programmes from the perspectives of varietal output and adoption: cassava, cowpea, soybean and yam in sub-Saharan Africa and maize in West and Central Africa’, in T. S. Walker and J. Alwang (eds) *Crop Improvement, Adoption, and Impact of improved varieties in Food Crops in Sub-Saharan Africa*, CAB International, Wallingford, UK
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision (Vol. 12, No. 3). FAO, Rome: ESA Working paper.
- Arima, E. Y., Richards, P., Walker, R., & Caldas, M. M. (2011). Statistical confirmation of indirect land use change in the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, 6(2), 024010.
- Arnold, D. (1996). *The Problem of Nature Environment, Culture and European Expansion*.
- Azen, R., Budescu, D. V., & Reiser, B. (2001). Criticality of predictors in multiple regression. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 54(2), 201-225.
- Baldi, G., & Paruelo, J. M. (2008). Land-use and land cover dynamics in South American temperate grasslands. *Ecology and Society*, 13(2).
- Baldi, G., Houspanossian, J., Murray, F., Rosales, A. A., Rueda, C. V., & Jobbágy, E. G. (2015). Cultivating the dry forests of South America: Diversity of land users and imprints on ecosystem functioning. *Journal of Arid Environments*, 123, 47-59.
- Balmford, A., Amano, T., Bartlett, H., Chadwick, D., Collins, A., Edwards, D., ... & Waters, H. (2018). The environmental costs and benefits of high-yield farming. *Nature Sustainability*, 1(9), 477.

- Balvanera, P., Uriarte, M., Almeida-Leñero, L., Altesor, A., DeClerck, F., Gardner, T., ... & Matos, D. M. S. (2012). Ecosystem services research in Latin America: The state of the art. *Ecosystem Services*, 2, 56-70.
- Banco Mundial (2013). Statistical data from the World Bank. <http://data.worldbank.org>
- Baptista, S. R., & Rudel, T. K. (2006). A re-emerging Atlantic forest? Urbanization, industrialization and the forest transition in Santa Catarina, southern Brazil. *Environmental Conservation*, 33(3), 195-202.
- Barbier, E. B., Burgess, J. C., & Grainger, A. (2010). The forest transition: Towards a more comprehensive theoretical framework. *Land use policy*, 27(2), 98-107.
- Barona, E., Ramankutty, N., Hyman, G., & Coomes, O. T. (2010). The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, 5(2), 024002.
- Barretto, A. G., Berndes, G., Sparovek, G., & Wirsenius, S. (2013). Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: an analysis of the 1975–2006 period. *Global change biology*, 19(6), 1804-1815.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2014). lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version, 1(7), 1-23.
- Batjes, N. H. (2012). ISRIC-WISE derived soil properties on a 5 by 5 arc-minutes global grid. ISRIC.
- Baumann, M., Israel, C., Piquer-Rodríguez, M., Gavier-Pizarro, G., Volante, J. N., & Kuemmerle, T. (2017). Deforestation and cattle expansion in the Paraguayan Chaco 1987–2012. *Regional environmental change*, 17(4), 1179-1191.
- Beale, C. M., Lennon, J. J., Yearsley, J. M., Brewer, M. J., & Elston, D. A. (2010). Regression analysis of spatial data. *Ecology letters*, 13(2), 246-264.
- Berbery, E. H., & Barros, V. R. (2002). The hydrologic cycle of the La Plata basin in South America. *Journal of Hydrometeorology*, 3(6), 630-645.
- Bernstein, A. S. (2014). Biological diversity and public health. *Annual review of public health*, 35, 153-167.
- Billen, G., Lassaletta, L., & Garnier, J. (2014). A biogeochemical view of the global agro-food system: Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. *Global Food Security*, 3(3), 209-219.
- Bini, L.M, Diniz-Filho, J. A. F., Rangel, T. F., Akre, T. S., Albaladejo, R. G., Albuquerque, F. S., ... & Isabel Bellocq, M. (2009). Coefficient shifts in geographical ecology: an empirical evaluation of spatial and non-spatial regression. *Ecography*, 32(2), 193-204.
- Bobbink, R., Hicks, K., Galloway, J., Spranger, T., Alkemade, R., Ashmore, M., ... & Emmett, B. (2010). Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. *Ecological applications*, 20(1), 30-59.
- Boillat, S., Scarpa, F. M., Robson, J. P., Gasparri, I., Aide, T. M., Aguiar, A. P. D., ... & Grau, H. R. (2017). Land system science in Latin America: challenges and perspectives. *Current opinion in environmental sustainability*, 26, 37-46.

- Bonhommeau, S., Dubroca, L., Le Pape, O., Barde, J., Kaplan, D. M., Chassot, E., & Nieblas, A. E. (2013). Eating up the world's food web and the human trophic level. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(51), 20617-20620.
- Borcard, D., Gillet, F., & Legendre, P. (2011). *Numerical ecology* with R. Springer, New York, NY.
- Borras Jr, S. M., Franco, J. C., Gómez, S., Kay, C., & Spoor, M. (2012). Land grabbing in Latin America and the Caribbean. *Journal of Peasant Studies*, 39(3-4), 845-872.
- Borras Jr, S. M., Franco, J. C., Isakson, S. R., Levidow, L., & Vervest, P. (2016). The rise of flex crops and commodities: implications for research.
- Boserup, E. (1965). *The conditions of agricultural growth: The economics of agrarian change under population pressure*. Routledge.
- Brancalion, P. H., Garcia, L. C., Loyola, R., Rodrigues, R. R., Pillar, V. D., & Lewinsohn, T. M. (2016). A critical analysis of the Native Vegetation Protection Law of Brazil (2012): updates and ongoing initiatives. *Natureza & Conservação*, 14, 1-15.
- Brannstrom, C. (2009). South America's neoliberal agricultural frontiers: Places of environmental sacrifice or conservation opportunity. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 38(3), 141-149.
- Brown, J. H. (2014). Why are there so many species in the tropics? *Journal of Biogeography*, 41(1), 8-22.
- Brush, S. B. (2008). *Farmers? Bounty: Locating Crop Diversity in the Contemporary World*. Yale University Press.
- Burke, M. B., Lobell, D. B., & Guarino, L. (2009). Shifts in African crop climates by 2050, and the implications for crop improvement and genetic resources conservation. *Global Environmental Change*, 19(3), 317-325.
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2003). *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*. Springer Science & Business Media.
- Byerlee, D., Stevenson, J., & Villoria, N. (2014). Does intensification slow crop land expansion or encourage deforestation? *Global food security*, 3(2), 92-98.
- Cáceres, D. M. (2015). Accumulation by Dispossession and Socio-Environmental Conflicts Caused by the Expansion of Agribusiness in Argentina. *Journal of Agrarian Change*, 15(1), 116-147.
- Cade, B. S. (2015). Model averaging and muddled multimodel inferences. *Ecology*, 96(9), 2370-2382.
- Caldwell, J. C., Caldwell, B. K., Caldwell, P., McDonald, P. F. y Schindlmayr, T. (2006). *Demographic transition theory* (p. 239). Dordrecht: Springer.
- Cardoso, F. H., & Faletto, E. (1969). *Dependencia y desarrollo en América Latina: ensayo de interpretación sociológica*. Siglo XXI.
- Cassidy, E. S., West, P. C., Gerber, J. S., & Foley, J. A. (2013). Redefining agricultural yields: from tonnes to people nourished per hectare. *Environmental Research Letters*, 8(3), 034015.

- Castañeda-Álvarez, N. P., Khoury, C. K., Achicanoy, H. A., Bernau, V., Dempewolf, H., Eastwood, R. J., ... & Müller, J. V. (2016). Global conservation priorities for crop wild relatives. *Nature plants*, 2(4), 16022.
- Ceddia, M. G., & Zepharovich, E. (2017). Jevons paradox and the loss of natural habitat in the Argentinean Chaco: The impact of the indigenous communities' land titling and the Forest Law in the province of Salta. *Land use policy*, 69, 608-617.
- Chaudhary, A., & Kastner, T. (2016). Land use biodiversity impacts embodied in international food trade. *Global Environmental Change*, 38, 195-204.
- Clark, M. L., Aide, T. M., Grau, H. R., & Riner, G. (2010). A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America. *Remote Sensing of Environment*, 114(11), 2816-2832.
- Clark, M., & Tilman, D. (2017). Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environmental Research Letters*, 12(6), 064016.
- Collins, S. L., Micheli, F., & Hartt, L. (2000). A method to determine rates and patterns of variability in ecological communities. *Oikos*, 91(2), 285-293.
- Crosby, A. W. (2003). *The Columbian exchange: biological and cultural consequences of 1492* (Vol. 2). Greenwood Publishing Group.
- Curtis, P. G., Slay, C. M., Harris, N. L., Tyukavina, A., & Hansen, M. C. (2018). Classifying drivers of global forest loss. *Science*, 361(6407), 1108-1111.
- d'Amour, C. B., Reitsma, F., Baiocchi, G., Barthel, S., Güneralp, B., Erb, K. H., ... & Seto, K. C. (2017). Future urban land expansion and implications for global croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(34), 8939-8944.
- Dalin, C., & Rodríguez-Iturbe, I. (2016). Environmental impacts of food trade via resource use and greenhouse gas emissions. *Environmental Research Letters*, 11(3), 035012.
- Dalin, C., Konar, M., Hanasaki, N., Rinaldo, A., & Rodríguez-Iturbe, I. (2012). Evolution of the global virtual water trade network. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(16), 5989-5994.
- Davis, A. S., Hill, J. D., Chase, C. A., Johanns, A. M., & Liebman, M. (2012). Increasing cropping system diversity balances productivity, profitability and environmental health. *PloSOne*, 7(10), e47149.
- de Astarloa, D. D., & Pengue, W. A. (2018). Nutrients Metabolism of Agricultural Production in Argentina: NPK Input and Output Flows from 1961 to 2015. *Ecological Economics*, 147, 74-83.
- De Janvry, A. (1981). *The agrarian question and reformism in Latin America* (No. HD1790. 5. Z8. D44 1981.). Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- De Sy, V., Herold, M., Achard, F., Beuchle, R., Clevers, J. G. P. W., Lindquist, E., & Verchot, L. (2015). Land use patterns and related carbon losses following deforestation in South America. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124004.

- Diamond, J. M. (1997). *Guns, germs and steel: a short history of everybody for the last 13,000 years*. Random House.
- Dias, L. C., Pimenta, F. M., Santos, A. B., Costa, M. H., & Ladle, R. J. (2016). Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. *Global change biology*, 22(8), 2887-2903.
- Díaz, S., & Cabido, M. (2001). Vive la difference: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(11), 646-655.
- Diniz-Filho, J. A. F., Rangel, T. F. L., & Bini, L. M. (2008). Model selection and information theory in geographical ecology. *Global ecology and biogeography*, 17(4), 479-488.
- D'Odorico, P., Carr, J. A., Laio, F., Ridolfi, L., & Vandoni, S. (2014). Feeding humanity through global food trade. *Earth's Future*, 2(9), 458-469.
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., ... & Münkemüller, T. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27-46.
- Dormann, C. F., McPherson, J. M., Araújo, M. B., Bivand, R., Bolliger, J., Carl, G., ... & Kühn, I. (2007). Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review. *Ecography*, 30(5), 609-628.
- Dornelas, M., Gotelli, N. J., McGill, B., Shimadzu, H., Moyes, F., Sievers, C., & Magurran, A. E. (2014). Assemblage time series reveal biodiversity change but not systematic loss. *Science*, 344(6181), 296-299.
- Drewnowski, A., & Popkin, B. M. (1997). The nutrition transition: new trends in the global diet. *Nutrition reviews*, 55(2), 31-43.
- Duffy, J. E. (2009). Why biodiversity is important to the functioning of real-world ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(8), 437-444.
- Ellis, E. C., Kaplan, J. O., Fuller, D. Q., Vavrus, S., Goldewijk, K. K., & Verburg, P. H. (2013). *Used planet: A global history*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201217241.
- Ellis, E. C., Klein Goldewijk, K., Siebert, S., Lightman, D., & Ramankutty, N. (2010). Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global ecology and biogeography*, 19(5), 589-606.
- Erb, K. H., Krausmann, F., Lucht, W., & Haberl, H. (2009). Embodied HANPP: Mapping the spatial disconnect between global biomass production and consumption. *Ecological Economics*, 69(2), 328-334.
- Erb, K. H., Lauk, C., Kastner, T., Mayer, A., Theurl, M. C., & Haberl, H. (2016). Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation. *Nature communications*, 7.
- Ewers, R. M., Scharlemann, J. P., Balmford, A., & Green, R. E. (2009). Do increases in agricultural yield spare land for nature? *Global Change Biology*, 15(7), 1716-1726.
- Fader, M., Gerten, D., Krause, M., Lucht, W., & Cramer, W. (2013). Spatial decoupling of agricultural production and consumption: quantifying dependences of

- countries on food imports due to domestic land and water constraints. *Environmental Research Letters*, 8(1), 014046.
- FAOSTAT (2018). Statistical data from the Food and Agriculture Organization of the United Nations, <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Fearnside, P. M. (2005). Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates, and consequences. *Conservation biology*, 19(3), 680-688.
- 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., Brosi, B., Daily, G. C., Ehrlich, P. R., Goldman, R., Goldstein, J., ... & Ranganathan, J. (2008). Should agricultural policies encourage land sparing or wildlife-friendly farming? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(7), 380-385.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R. et al. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M et al. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2001) Food Balance Sheets. A handbook. Rome, Italy.
- Fritz, S., See, L., McCallum, I., You, L., Bun, A., Moltchanova, E., ... & Havlik, P. (2015). Mapping global cropland and field size. *Global change biology*, 21(5), 1980-1992.
- Gabella, J. I., & Strijker, D. (2018). Sustainability or resilience? A case study in the semi-arid Pampean region of Argentina. *Resilience*, 1-20.
- Galipaud, M., Gillingham, M. A., & Dechaume-Moncharmont, F. X. (2017). A farewell to the sum of Akaike weights: the benefits of alternative metrics for variable importance estimations in model selection. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(12), 1668-1678.
- Galloway, J. N. y Cowling, E. B. (2002). Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *AMBIO*, 31(2), 64-71.
- Gardner, T. A., Benzie, M., Börner, J., Dawkins, E., Fick, S., Garrett, R., ... & Mardas, N. (2018). Transparency and sustainability in global commodity supply chains. *World Development*.
- Garibaldi, L. A., Gemmill-Herren, B., D'Annolfo, R., Graeub, B. E., Cunningham, S. A., & Breeze, T. D. (2017). Farming approaches for greater biodiversity, livelihoods, and food security. *Trends in ecology & evolution*, 32(1), 68-80.
- Garrett, R. D., Lambin, E. F., & Naylor, R. L. (2013). The new economic geography of land use change: Supply chain configurations and land use in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, 34, 265-275.
- Gasparri, N. I., Grau, H. R., & Angonese, J. G. (2013). Linkages between soybean and neotropical deforestation: coupling and transient decoupling dynamics in a multi-decadal analysis. *Global Environmental Change*, 23(6), 1605-1614.

- Gasparri, N. I., Grau, H. R., & Sacchi, L. V. (2015). Determinants of the spatial distribution of cultivated land in the North Argentine Dry Chaco in a multi-decadal study. *Journal of arid environments*, 123, 31-39.
- Gasparri, N. I., & de Waroux, Y. L. P. (2015). The coupling of South American soybean and cattle production frontiers: new challenges for conservation policy and land change science. *Conservation Letters*, 8(4), 290-298.
- Gaudin, A. C., Tolhurst, T. N., Ker, A. P., Janovicek, K., Tortora, C., Martin, R. C., & Deen, W. (2015). Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability. *PloS One*, 10(2), e0113261.
- Giam, X., & Olden, J. D. (2016). Quantifying variable importance in a multimodel inference framework. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(4), 388-397.
- Godar, J., Persson, U. M., Tizado, E. J., & Meyfroidt, P. (2015). Towards more accurate and policy relevant footprint analyses: tracing fine-scale socio-environmental impacts of production to consumption. *Ecological Economics*, 112, 25-35.
- Godfray, H. C. J., J.R. Beddington, I.R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J.F. Muir, J. F et al. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812-818.
- Gonzalez, A., Cardinale, B. J., Allington, G. R., Byrnes, J., Arthur Endsley, K., Brown, D. G., ... & Loreau, M. (2016). Estimating local biodiversity change: a critique of papers claiming no net loss of local diversity. *Ecology*, 97(8), 1949-1960.
- Graesser, J., Aide, T. M., Grau, H. R., & Ramankutty, N. (2015). Cropland/pastureland dynamics and the slowdown of deforestation in Latin America. *Environmental Research Letters*, 10(3), 034017.
- Graesser, J., Ramankutty, N., & Coomes, O. T. (2018). Increasing expansion of large-scale crop production onto deforested land in sub-Andean South America. *Environmental Research Letters*, 13(8), 084021.
- Graham, M. H. (2003). Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology*, 84(11), 2809-2815.
- Grau, H. R., Gasparri, N. I., & Aide, T. M. (2005). Agriculture expansion and deforestation in seasonally dry forests of north-west Argentina. *Environmental Conservation*, 32(2), 140-148.
- Grau, H. R., Gasparri, N. I., & Aide, T. M. (2008). Balancing food production and nature conservation in the Neotropical dry forests of northern Argentina. *Global Change Biology*, 14(5), 985-997.
- Green, R. E., Cornell, S. J., Scharlemann, J. P., & Balmford, A. (2005). Farming and the fate of wild nature. *science*, 307(5709), 550-555.
- Gross, K., Cardinale, B. J., Fox, J. W., Gonzalez, A., Loreau, M., Polley, H. W. et al. (2014). Species richness and the temporal stability of biomass production: a new analysis of recent biodiversity experiments. *The American Naturalist*, 183(1), 1-12.
- Grueber, C. E., Nakagawa, S., Laws, R. J., & Jamieson, I. G. (2011). Multimodel inference in ecology and evolution: challenges and solutions. *Journal of evolutionary biology*, 24(4), 699-711.

- Guereña, A., & Burgos, S. O. (2016). *Desterrados: Tierra, poder y desigualdad en América Latina*. Oxfam international.
- Hallett, L. M., Jones, S. K., MacDonald, A. A. M., Jones, M. B., Flynn, D. F., Ripplinger, J., ... & Collins, S. L. (2016). *codyn: an R package of community dynamics metrics*. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(10), 1146-1151. FAOSTAT 2017
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A. & Kommareddy, A. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850-853.
- Harcourt, A. H. (2015). *Humankind: How Biology and Geography Shape Human Diversity*. Pegasus Books.
- Harlan, J. R., Gepts, P., Famula, T. R., & Bettinger, R. L. (Eds.). (2012). *Biodiversity in agriculture: domestication, evolution, and sustainability*. Cambridge University Press.
- Harrison, X. A., Donaldson, L., Correa-Cano, M. E., Evans, J., Fisher, D. N., Goodwin, C. E., ... & Inger, R. (2018). A brief introduction to mixed effects modelling and multi-model inference in ecology. *PeerJ*, 6, e4794.
- Hartig, F. (2017). *DHARMa: residual diagnostics for hierarchical (multi-level/mixed) regression models*. R package version 0.1. 5.
- Hawkes, C. (2006). Uneven dietary development: linking the policies and processes of globalization with the nutrition transition, obesity and diet-related chronic diseases. *Globalization and health*, 2(1), 4.
- Hawkins, B. A. (2012). Eight (and a half) deadly sins of spatial analysis. *Journal of Biogeography*, 39(1), 1-9.
- Henders, S., Persson, U. M., & Kastner, T. (2015). Trading forests: land-use change and carbon emissions embodied in production and exports of forest-risk commodities. *Environmental Research Letters*, 10(12), 125012.
- 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
- Herrero, M., Wirsenius, S., Henderson, B., Rigolot, C., Thornton, P., Havlík, P., ... & Gerber, P. J. (2015). Livestock and the environment: what have we learned in the past decade? *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 177-202.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 25(15), 1965-1978
- Hornborg, A. (1998). Towards an ecological theory of unequal exchange: articulating world system theory and ecological economics. *Ecological Economics*, 25(1), 127-136.
- Houghton, R. A., House, J. I., Pongratz, J., Van der Werf, G. R., DeFries, R. S., Hansen, M. C., ... & Ramankutty, N. (2012). Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences*, 9(12), 5125-5142.

- Hunter, D., Guarino, L., Spillane, C. & McKeown, P (Eds.) Handbook of Agricultural Biodiversity. New York: Routledge.
- Izumi, T., & Ramankutty, N. (2015). How do weather and climate influence cropping area and intensity? *Global Food Security*, 4, 46-50.
- IPES (2016). From uniformity to diversity: a paradigm shift from industrial agriculture to diversified agroecological systems. International Panel of Experts on Sustainable Food systems. www.ipes-food.org
- Isbell, F. I., Polley, H. W., & Wilsey, B. J. (2009). Biodiversity, productivity and the temporal stability of productivity: patterns and processes. *Ecology letters*, 12(5), 443-451.
- Jackson, R. B., Carpenter, S. R., Dahm, C. N., McKnight, D. M., Naiman, R. J., Postel, S. L., & Running, S. W. (2001). Water in a changing world. *Ecological applications*, 11(4), 1027-1045.
- Jarvis, D. I., Brown, A. H., Cuong, P. H., Collado-Panduro, L., Latournerie-Moreno, L., Gyawali, S., ... & Hue, N. T. N. (2008). A global perspective of the richness and evenness of traditional crop-variety diversity maintained by farming communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(14), 5326-5331.
- Jobbágy, E. G., & Sala, O. E. (2014). The imprint of crop choice on global nutrient needs. *Environmental Research Letters*, 9(8), 084014.
- Johnson, J. W., & LeBreton, J. M. (2004). History and use of relative importance indices in organizational research. *Organizational research methods*, 7(3), 238-257.
- Jones, A. D., Shrinivas, A., & Bezner-Kerr, R. (2014). Farm production diversity is associated with greater household dietary diversity in Malawi: findings from nationally representative data. *Food Policy*, 46, 1-12.
- Jorgenson, A. K. (2006). Unequal ecological exchange and environmental degradation: a theoretical proposition and cross-national study of deforestation, 1990–2000. *Rural Sociology*, 71(4), 685-712.
- Jorgenson, A.K (2016). Environment, Development, and Ecologically Unequal Exchange. *Sustainability*, 8, 227; doi:10.3390/su8030227
- Kant, A. K. (2004). Dietary patterns and health outcomes. *Journal of the American Dietetic Association*, 104(4), 615-635.
- Kastner, T., Rivas, M. J. I., Koch, W., & Nonhebel, S. (2012). Global changes in diets and the consequences for land requirements for food. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201117054.
- Kearney, J. (2010). Food consumption trends and drivers. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 365(1554), 2793-2807.
- Khoury, C. K., Achicanoy, H. A., Bjorkman, A. D., Navarro-Racines, C., Guarino, L., Flores-Palacios, X., ... & Ramírez-Villegas, J. (2016). Origins of food crops connect countries worldwide. *Proceedings of the Royal Society B*, 283(1832), 20160792.

- Khoury, C. K., Bjorkman, A. D., Dempewolf, H., Ramirez-Villegas, J., Guarino, L., Jarvis, A., ...&Struik, P. C. (2014). Increasing homogeneity in global food supplies and the implications for food security. *PNAS*, 111(11), 4001-4006.
- Killeen, T. J., Guerra, A., Calzada, M., Correa, L., Calderon, V., Soria, L., ...&Steininger, M. K. (2008). Total historical land-use change in eastern Bolivia: who, where, when, and how much. *Ecology and Society*, 13(1), 36.
- Kreft, H., & Jetz, W. (2007). Global patterns and determinants of vascular plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(14), 5925-5930.
- 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.
- Krugman, P. R., & Obstfeld, M. (2009). *International Economics: Policy and Theory*. Pearson.
- Laliberté, E., & Legendre, P. (2010). A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 91(1), 299-305.
- Lambin, E. F., & Meyfroidt, P. (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(9), 3465-3472.
- Lambin, E. F., & Thorlakson, T. (2018). Sustainability Standards: Interactions Between Private Actors, Civil Society, and Governments. *Annual Review of Environment and Resources*, (0).
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual review of environment and resources*, 28(1), 205-241.
- Lambin, E. F., Gibbs, H. K., Ferreira, L., Grau, R., Mayaux, P., Meyfroidt, P., ...&Munger, J. (2013). Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach. *Global Environmental Change*, 23(5), 892-901.
- Lambin, E. F., Gibbs, H. K., Heilmayr, R., Carlson, K. M., Fleck, L. C., Garrett, R. D., ... & Nolte, C. (2018). The role of supply-chain initiatives in reducing deforestation. *Nature Climate Change*, 1.
- Lapola, D. M., Martinelli, L. A., Peres, C. A., Ometto, J. P., Ferreira, M. E., Nobre, C. A., ... & Joly, C. A. (2014). Pervasive transition of the Brazilian land-use system. *Nature climate change*, 4(1), 27.
- le Polain de Waroux, Y., Garrett, R., Graesser, J., Nolte, C., White, C., & Lambin, E. (2017). The restructuring of South American soy and beef production and trade under changing environmental regulations. *World development*, 15.
- Leff, B., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2004). Geographic distribution of major crops across the world. *Global biogeochemical cycles*, 18(1).
- Legendre, P. (2014). *lmodel2: Model II Regression*. R package version 1.7-2.
- Legendre, P., & Legendre, L. (1998). *Numerical Ecology*, Volume 24, (Developments in Environmental Modelling).

- Lenzen, M., Moran, D., Kanemoto, K., Foran, B., Lobefaro, L., & Geschke, A. (2012). International trade drives biodiversity threats in developing nations. *Nature*, 486(7401), 109.
- Li, C., He, X., Zhu, S., Zhou, H., Wang, Y., Li, Y., ...& Long, Y. (2009). Crop diversity for yield increase. *PLoS One*, 4(11), e8049.
- Lin, B. B. (2011). Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience*, 61(3), 183-193.
- Liu, J., V. Hull, M. Batistella, R. DeFries, T. Dietz, F. Fu et al. (2013). Framing Sustainability in a Telecoupled World. *Ecology and Society*, 18(2), 26.
- Macchi, L., Grau, H. R., Zelaya, P. V., & Marinaro, S. (2013). Trade-offs between land use intensity and avian biodiversity in the dry Chaco of Argentina: A tale of two gradients. *Agriculture, ecosystems & environment*, 174, 11-20.
- Macedo, M. N., DeFries, R. S., Morton, D. C., Stickler, C. M., Galford, G. L., & Shimabukuro, Y. E. (2012). Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(4), 1341-1346.
- Mahood, S. P., Lees, A. C., & Peres, C. A. (2012). Amazonian countryside habitats provide limited avian conservation value. *Biodiversity and Conservation*, 21(2), 385-405.
- Mann, C. C. (2011). 1493: Uncovering the new world Columbus created. Vintage.
- Marengo, J. A., Torres, R. R., & Alves, L. M. (2017). Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3-4), 1189-1200.
- Martens, P., & Rotmans, J. (2005). Transitions in a globalising world. *Futures*, 37(10), 1133-1144.
- Martinelli, L. A., & Filoso, S. (2008). Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. *Ecological applications*, 18(4), 885-898.
- Massawe, F., Mayes, S., & Cheng, A. (2016). Crop diversity: an unexploited treasure trove for food security. *Trends in plant science*, 21(5), 365-368.
- Mastrangelo, M. E., & Gavin, M. C. (2012). Trade-offs between cattle production and bird conservation in an agricultural frontier of the Gran Chaco of Argentina. *Conservation Biology*, 26(6), 1040-1051.
- Mastrangelo, M. E., Weyland, F., Villarino, S. H., Barral, M. P., Nahuelhual, L., & Laterra, P. (2014). Concepts and methods for landscape multifunctionality and a unifying framework based on ecosystem services. *Landscape Ecology*, 29(2), 345-358.
- Mather, A. S. (1992). The forest transition. *Area*, 367-379.
- Mazoyer, M., & Roudart, L. (2007). A history of world agriculture: from the neolithic age to the current crisis. Routledge.
- McGill, B. J., Dornelas, M., Gotelli, N. J., & Magurran, A. E. (2015). Fifteen forms of biodiversity trend in the Anthropocene. *Trends in ecology & evolution*, 30(2), 104-113.

- McKinney, M. L., & Lockwood, J. L. (1999). Biotic homogenization: a few winners replacing many losers in the next mass extinction. *Trends in ecology & evolution*, 14(11), 450-453.
- Meyfroidt, P. (2016). Approaches and terminology for causal analysis in land systems science. *Journal of Land Use Science*, 11(5), 501-522.
- Meyfroidt, P., & Lambin, E. F. (2011). Global forest transition: prospects for an end to deforestation. *Annual review of environment and resources*, 36, 343-371.
- Meyfroidt, P., Carlson, K. M., Fagan, M. E., Gutiérrez-Vélez, V. H., Macedo, M. N., Curran, L. M., ... & Morton, D. C. (2014). Multiple pathways of commodity crop expansion in tropical forest landscapes. *Environmental Research Letters*, 9(7), 074012.
- Meyfroidt, P., Chowdhury, R. R., de Bremond, A., Ellis, E. C., Erb, K. H., Filatova, T., ... & Kull, C. A. (2018). Middle-range theories of land system change. *Global Environmental Change*, 53, 52-67.
- Meyfroidt, P., Rudel, T. K. y Lambin, E. F. (2010). Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *PNAS*, 107(49), 20917-20922
- Monfreda, C., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2008). Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global biogeochemical cycles*, 22(1).
- Mueller, ND, JS Gerber, M Johnston, DK Ray, N Ramankutty, and JA Foley. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature* doi:10.1038/nature11420. 490:254-257.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853.
- Nakagawa, S., & Schielzeth, H. (2013). A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2), 133-142.
- Nanni, A. S., & Grau, H. R. (2014). Agricultural adjustment, population dynamics and forests redistribution in a subtropical watershed of NW Argentina. *Regional environmental change*, 14(4), 1641-1649.
- Naylor, R. L. (2009). Managing food production systems for resilience. In *Principles of Ecosystem Stewardship* (pp. 259-280). Chapin, F. S., Kofinas, G. P. y Folke, C (eds.). Springer New York.
- Nelson, A. (2008) Travel time to major cities: A global map of Accessibility. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. DOI:10.2788/95835, ISBN:978-92-79-09771-3.
- Nelson, E. J., Helmus, M. R., Cavender-Bares, J., Polasky, S., Lasky, J. R., Zanne, A. E., ... & Fagan, W. F. (2016). Commercial plant production and consumption still follow the latitudinal gradient in species diversity despite economic globalization. *PloS one*, 11(10), e0163002.
- Nepstad, D., Soares-Filho, B. S., Merry, F., Lima, A., Moutinho, P., Carter, J., ... & McGrath, D. G. (2009). The end of deforestation in the Brazilian Amazon. *Science*, 326(5958), 1350-1351.

- Newbold, T., Hudson, L. N., Hill, S. L., Contu, S., Lysenko, I., Senior, R. A. & Day, J. (2015). Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520(7545), 45-50.
- Niewöhner, J., Bruns, A., Haberl, H., Hostert, P., Krueger, T., Lauk, C., ... & Nielsen, J. Ø. (2016). Land use competition: Ecological, economic and social perspectives. In *Land Use Competition* (pp. 1-17). Springer, Cham.
- Nolte, C., le Polain de Waroux, Y., Munger, J., Reis, T. N., & Lambin, E. F. (2017). Conditions influencing the adoption of effective anti-deforestation policies in South America's commodity frontiers. *Global environmental change*, 43, 1-14.
- Noss, R. F. (1990). Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation biology*, 4(4), 355-364.
- Nyborg, K., J. M. Anderies, A. Dannenberg, T. Lindahl, C. Schill, M. Schüter, W. N. Adger, K. J. Arrow, S. Barrett, S. Carpenter, F. S. Chapin III, A. S. Crépin, G. Daily, P. Ehrlich, C. Folke, W. Jager, N. Kautsky, S. A. Levin, O. J. Madsen, S. Polasky, M. Scheffer, B. Walker, E. U. Weber, J. Wilen, A. Xepapadeas, and A. de Zeeuw. 2016. Social norms as solutions. *Science* 354:42–43.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., O'hara, R. B., Simpson, G. L., ... & Wagner, H. (2010). *vegan: Community Ecology Package*. R package version 1.17-2. R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V., Underwood, E. C. et al (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, 51(11), 933-938.
- Ostrom, E. (2000). Collective action and the evolution of social norms. *Journal of economic perspectives*, 14(3), 137-158.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., & Verón, S. R. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia hoy*, 15(87), 14-23.
- Pellegrini, P., & Fernández, R. J. (2018). Crop intensification, land use, and on-farm energy-use efficiency during the worldwide spread of the green revolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(10), 2335-2340.
- Perz, S. G. (2007). Grand theory and context-specificity in the study of forest dynamics: forest transition theory and other directions. *The Professional Geographer*, 59(1), 105-114.
- Pfaff, A., Robalino, J., Walker, R., Aldrich, S., Caldas, M., Reis, E., ... & Kirby, K. (2007). Road investments, spatial spillovers, and deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of Regional Science*, 47(1), 109-123.
- Phalan, B., Onial, M., Balmford, A., & Green, R. E. (2011). Reconciling food production and biodiversity conservation: land sharing and land sparing compared. *Science*, 333(6047), 1289-1291.
- Pieterse, J. N. (2015). *Globalization and culture: Global mélange*. Rowman & Littlefield.
- Pingali P (2007) Westernization of Asian diets and the transformation of food systems: Implications for research and policy. *Food Policy* 32(3):281–298.

- Pingali, P. (2017). The Green Revolution and Crop Diversity (Chapter 12). In D. Hunter, L. Guarino, C. Spillane, and P. McKeown (Eds.) *Handbook of Agricultural Biodiversity*. New York: Routledge.
- Popkin, B. M. (1993). Nutritional patterns and transitions. *Population and Development Review*, 138-157
- Popkin, B. M. (2006). Global nutrition dynamics: the world is shifting rapidly toward a diet linked with noncommunicable diseases—. *The American journal of clinical nutrition*, 84(2), 289-298.
- Popkin, B. M., Adair, L. S., & Ng, S. W. (2012). Global nutrition transition and the pandemic of obesity in developing countries. *Nutrition reviews*, 70(1), 3-21.
- Porkka, M., Kummu, M., Siebert, S., & Varis, O. (2013). From food insufficiency towards trade dependency: a historical analysis of global food availability. *PloSOne*, 8(12), e82714.
- Price, T. D., & Bar-Yosef, O. (2011). The origins of agriculture: new data, new ideas: an introduction to supplement 4. *Current Anthropology*, 52(S4), S163-S174.
- Puma, M. J., Bose, S., Chon, S. Y., & Cook, B. I. (2015). Assessing the evolving fragility of the global food system. *Environmental Research Letters*, 10(2), 024007.
- Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 593-596.
- Ramankutty, N., and J.A. Foley (1999). Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992, *Global biogeochemical cycles* 13(4), 997-1027.
- Ramankutty, N., Evan, A. T., Monfreda, C., & Foley, J. A. (2008). Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(1).
- Ramankutty, N., Mehrabi, Z., Waha, K., Jarvis, L., Kremen, C., Herrero, M., & Rieseberg, L. H. (2018). Trends in global agricultural land use: implications for environmental health and food security. *Annual review of plant biology*, 69, 789-815.
- Ray, D. K., Ramankutty, N., Mueller, N. D., West, P. C., & Foley, J. A. (2012). Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nature communications*, 3, 1293.
- Reboratti, C. (2012). Socio-environmental Conflicts in Latin America. *Journal of Latin American Geography*, 11(2), 1-1.
- Remans, R., DeClerck, F. A., Kennedy, G., & Fanzo, J. (2015). Expanding the view on the production and dietary diversity link: Scale, function, and change over time. *PNAS*, 201518531.
- Ricklefs, R. E. (1987). Community diversity: relative roles of local and regional processes. *Science*, 235(4785), 167-171.
- Ricklefs, R. E. (2004). A comprehensive framework for global patterns in biodiversity. *Ecology letters*, 7(1), 1-15.

- Ricotta, C., & Avena, G. (2003). On the relationship between Pielou's evenness and landscape dominance within the context of Hill's diversity profiles. *Ecological Indicators*, 2(4), 361-365.
- Ripley, B., Venables, B., Bates, D. M., Hornik, K., Gebhardt, A., Firth, D., & Ripley, M. B. (2013). Package 'mass'. CRAN R.
- Romero-Muñoz, A., Torres, R., Noss, A. J., Giordano, A. J., Quiroga, V., Thompson, J. J., ... & Arispe, R. Habitat loss and overhunting synergistically drive the extirpation of jaguars from the Gran Chaco. *Diversity and Distributions*.
- Rosenzweig, M. L. (1995). *Species diversity in space and time*. Cambridge University Press.
- Rounsevell, M. D., Pedrolí, B., Erb, K. H., Gramberger, M., Busck, A. G., Haberl, H., ... & Lotze-Campen, H. (2012). Challenges for land system science. *Land use policy*, 29(4), 899-910.
- Rueda, C. V., Baldi, G., Verón, S. R., & Jobbágy, E. G. (2013). Apropiación humana de la producción primaria en el Chaco Seco. *Ecología austral*, 23(1), 44-54.
- Ruel, M. T. (2003). Operationalizing dietary diversity: a review of measurement issues and research priorities. *The Journal of nutrition*, 133(11), 3911S-3926S.
- Rulli, M. C., Savioli, A., & D'Odorico, P. (2013). Global land and water grabbing. *PNAS*, 110(3), 892-897.
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T., Salas, W., ... & Petrova, S. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24), 9899-9904.
- Sadras, V. O., Grassini, P., Costa, R., Cohan, L., & Hall, A. J. (2014). How reliable are crop production data? Case studies in USA and Argentina. *Food security*, 6(4), 447-459.
- Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R. et al. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287(5459), 1770-1774.
- Saltelli, A., & Giampietro, M. (2017). What is wrong with evidence based policy, and how can it be improved? *Futures*, 91, 62-71.
- Satorre, E. H. (2005). Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Ciencia hoy*, 15(87), 24-31.
- Scheffer, M., Westley, F., & Brock, W. (2003). Slow response of societies to new problems: causes and costs. *Ecosystems*, 6(5), 493-502.
- Schipanski, M. E. y Bennett, E. M. (2012). The influence of agricultural trade and livestock production on the global phosphorus cycle. *Ecosystems*, 15(2), 256-268.
- Schipanski, M. E., MacDonald, G. K., Rosenzweig, S., Chappell, M. J., Bennett, E. M., Kerr, R. B. & Schnarr, C. (2016). Realizing Resilient Food Systems. *BioScience*.
- Schmidhuber, J., & Tubiello, F. N. (2007). Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19703-19708.

- Siebert, S., Kummu, M., Porkka, M., Döll, P., Ramankutty, N., & Scanlon, B. R. (2015). A global data set of the extent of irrigated land from 1900 to 2005. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(3), 1521-1545.
- Smale, M. (1997). The green revolution and wheat genetic diversity: some unfounded assumptions. *World development*, 25(8), 1257-1269
- Smith, P., Gregory, P. J., Van Vuuren, D., Obersteiner, M., Havlík, P., Rounsevell, M., ... & Bellarby, J. (2010). Competition for land. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 365(1554), 2941-2957.
- Sobre la Tierra. 2018. Una Ley para conservar la biodiversidad en ambientes cultivados. Disponible en: <http://sobrelatierra.agro.uba.ar/una-ley-para-conservar-la-biodiversidad-en-ambientes-cultivados/>. Fecha de acceso: 16/11/2018.
- Spera, S., VanWey, L., & Mustard, J. (2017). The drivers of sugarcane expansion in Goiás, Brazil. *Land Use Policy*, 66, 111-119.
- Stott, I., Soga, M., Inger, R., & Gaston, K. J. (2015). Land sparing is crucial for urban ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(7), 387-393.
- Suweis, S., Carr, J. A., Maritan, A., Rinaldo, A., & D'Odorico, P. (2015). Resilience and reactivity of global food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(22), 6902-6907.
- Symonds, M. R., & Moussalli, A. (2011). A brief guide to model selection, multimodel inference and model averaging in behavioural ecology using Akaike's information criterion. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 65(1), 13-21.
- Tilman, D. (1996). Biodiversity: population versus ecosystem stability. *Ecology*, 77(2), 350-363.
- Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518-522.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *PNAS*, 108(50), 20260-20264.
- Tilman, D., Isbell, F., & Cowles, J. M. (2014). Biodiversity and ecosystem functioning. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 45(1), 471.
- Tittonell, P., Klerkx, L., Baudron, F., Félix, G. F., Ruggia, A., van Apeldoorn, D. & Rosling, W. A. (2016). Ecological Intensification: Local Innovation to Address Global Challenges. In *Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 1-34). Springer International Publishing.
- Torreggiani, S., Mangioni, G., Puma, M. J., & Fagiolo, G. (2018). Identifying the community structure of the food-trade international multi-network. *Environmental Research Letters*, 13(5), 054026.
- Trolio, J., Eckman, M., & Mehta, K. (2016). Leveraging Globalization to Revive Traditional Foods. *Journal of Sustainable Development*, 9(6), 212.
- Turner, B. L., & Ali, A. S. (1996). Induced intensification: Agricultural change in Bangladesh with implications for Malthus and Boserup. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(25), 14984-14991.
- United Nations. (2015). *Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*

- Vakis R; J Rigolini& L Lucchetti. 2015. Left behind: chronic poverty in Latin America and the Caribbean. World Bank Publications.
- Vallejos, M., Volante, J. N., Mosciaro, M. J., Vale, L. M., Bustamante, M. L., & Paruelo, J. M. (2015). Transformation dynamics of the natural cover in the Dry Chaco ecoregion: A plot level geo-database from 1976 to 2012. *Journal of Arid Environments*, 123, 3-11.
- VanWey, L. K., Ostrom, E., & Meretsky, V. (2005). Theories underlying the study of human-environment interactions. In *Seeing the forest and the trees: Human-environment interactions in forest ecosystems*, 23-56. Morán, E.F. y Ostrom E. (eds.). MIT Press
- Vatn, A. (2015). Global environmental governance. In J. Martínez-Alier & R. Muradian (Eds.), *Handbook of Ecological Economics* (p. 382). Edward Elgar Publishing.
- Vega, E., Baldi, G., Jobbagy, E. G., & Paruelo, J. (2009). Land use change patterns in the Río de la Plata grasslands: the influence of phytogeographic and political boundaries. *Agriculture, ecosystems & environment*, 134(3-4), 287-292.
- Vellend, M., Baeten, L., Becker-Scarpitta, A., Boucher-Lalonde, V., McCune, J. L., Messier, J., ... & Sax, D. F. (2017). Plant biodiversity change across scales during the Anthropocene. *Annual Review of Plant Biology*, 68.
- Viglizzo, E. F., Frank, F. C., Carreño, L. V., JobbÁgy, E. G., Pereyra, H., Clatt, J., ... & Ricard, M. F. (2011). Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*, 17(2), 959-973.
- Villéger, S., Mason, N. W., & Mouillot, D. (2008). New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology*, 89(8), 2290-2301.
- Volante, J. N., & Paruelo, J. M. (2015). Is forest or Ecological Transition taking place? Evidence for the Semiarid Chaco in Argentina. *Journal of Arid Environments*, 123, 21-30.
- Wallerstein, I. M. (2004). *World-systems analysis: An introduction*. Duke University Press
- Wang, S., & Loreau, M. (2014). Ecosystem stability in space: α , β and γ variability. *Ecology letters*, 17(8), 891-901.
- Weinzettel, J., Hertwich, E. G., Peters, G. P., Steen-Olsen, K., & Galli, A. (2013). Affluence drives the global displacement of land use. *Global Environmental Change*, 23(2), 433-438.
- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 213-251.
- Williams, M., Zalasiewicz, J., Haff, P. K., Schwägerl, C., Barnosky, A. D., & Ellis, E. C. (2015). The Anthropocene biosphere. *The Anthropocene Review*, 2(3), 196-219.
- Wood, S. A., Smith, M. R., Fanzo, J., Remans, R., & DeFries, R. S. (2018). Trade and the equitability of global food nutrient distribution. *Nature Sustainability*, 1(1), 34.

- Yu, Y., Feng, K., & Hubacek, K. (2013). Tele-connecting local consumption to global land use. *Global Environmental Change*, 23(5), 1178-1186.
- Zimmerer, K. S. (2010). Biological diversity in agriculture and global change. *Annual Review of Environment and Resources*, 35, 137-166.
- Zimmerer, K. S., & De Haan, S. (2017). Agrobiodiversity and a sustainable food future. *Nature Plants*, 3, 17047.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N.J., Saveliev, A.A. & Smith, G. M. 2009. Mixed effects models and extensions in ecology with R.

Apéndices

Apéndice I: Material suplementario del Capítulo 2

Lista de países

Albania	Ecuador	Liberia	Arabia Saudita
Argelia	Egipto	Libia	Senegal
Angola	El Salvador	Madagascar	Sierra Leona
Argentina	Etiopía	Malawi	Islas Salomón
Australia	Fiji	Malasia	Sudáfrica
Austria	Finlandia	Maldivas	Corea del Sir
Bahamas	Francia	Mali	España
Bangladesh	Guyana Francesa	Malta	Sri Lanka
Barbados	Gabón	Mauritania	Sudán
Bélgica - Luxemburgo	Gambia	Mauritius	Surinam
Belice	Alemania	México	Suazilandia
Benín	Ghana	Mongolia	Suecia
Bolivia	Grecia	Marruecos	Suiza
Botsuana	Granada	Mozambique	Siria
Brasil	Guatemala	Myanmar	Tanzania
Brunéi Darussalam	Guinea	Namibia	Tailandia
Bulgaria	Guinea Bissau	Nepal	Timor-Leste
Burkina Faso	Guyana	Holanda	Todo
Burundi	Haití	Nueva Caledonia	Trinidad y Tobago
Camboya	Honduras	Nueva Zelanda	Túnez
Camerún	Hungría	Nicaragua	Turquía
Canadá	Islandia	Níger	Uganda
República centroafricana	India	Nigeria	Reino Unido
Chad	Indonesia	Corea del Norte	Estados Unidos
Chile	Irán	Noruega	Uruguay
China	Iraq	Pakistán	URSS
Colombia	Irlanda	Panamá	Vanatú
Comoros	Israel	Paraguay	Venezuela
Congo	Italia	Perú	Vietnam
Costa Rica	Jamaica	Filipinas	Yemen
Cuba	Japón	Polonia	Yugoslavia
Chipre	Jordania	Portugal	Zambia
Checoslovaquia	Kenia	Rumania	Zimbabue
Dinamarca	Lao	Ruanda	
Dominica	Líbano	San Vicente	
República Dominicana	Lesoto	Santo Tomé y Príncipe	

Lista de cultivos

Para mayor detalle ver información suplementaria de Khoury et al. (2014) (Link: <http://www.pnas.org/content/111/11/4001/tab-figures-data>) y Prescott-Allen R, Prescott-Allen C (1990) How many plants feed the world? Conservation Biology 4(4):365–374

Cultivo	Descripción – Cultivos y variedades incluidos
Trigo	<i>Triticum aestivum</i> L., <i>T. turgidum</i> L., <i>Triticum durum</i> Desf.
Arroz	<i>Oryza sativa</i> L., <i>O. glaberrima</i> Steud.
Maíz	<i>Zea mays</i>
Cebada	<i>Hordeum vulgare</i> L.
Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench
Mijo	<i>Pennisetum glaucu</i> , <i>Eleusine coracana</i> , <i>Eragrostis tef</i>
Cereales, otros	Alforfón, Quinoa, Fonio, Triticale y Alpiste
Centeno	<i>Secale cereale</i> L.
Avena	<i>Avena sativa</i> L.
Papa	<i>Solanum tuberosum</i> L.
Mandioca	<i>Manihot esculenta</i> Crantz
Raíces, otros	<i>Colocasia esculenta</i> , <i>Xanthosoma sagittifolium</i>
Batata	<i>Ipomoea batatas</i> (L.) Poir.
Ñame	<i>Dioscorea rotundata</i> Poir, <i>D. cayennensis</i> Lam, <i>D. alata</i> L.
Azúcar	<i>Saccharum officinarum</i> L.), Sugar beet (<i>Beta vulgaris</i> L.
Edulcorantes, otros	<i>Acer saccharum</i>
Legumbres, otros (lentejas, garbanzos, etc)	<i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp., <i>Cicer arietinum</i> L., <i>Lens culinaris</i> Medik., <i>Vicia faba</i> L., <i>Cajanus cajan</i> (L.) Millsp.
Porotos	<i>Phaseolus vulgaris</i> L., <i>P. lunatus</i> L

Cultivo	Descripción – Cultivos y variedades incluidos
Arvejas	<i>Pisum sativum L.</i>
Soja	<i>Glycine max (L.) Merr.</i>
Palma aceitera	<i>Elaeis guineensis Jacq.</i> , <i>E. oleifera (Kunth) Cortés</i>
Maní	<i>Arachis hypogaea L.</i>
Coco	<i>Cocos nucifera L.</i>
Girasol	<i>Helianthus annuus L.</i>
Oleaginosas, otros (aceite de lino, cártamo, ricino, etc)	<i>Vitellaria paradoxa C. F. Gaertn.</i>
Nueces	Almendra (<i>Prunus dulcis</i>), Nuez (<i>Juglans regia L.</i>), Pistacho (<i>Pistacia vera L.</i>), Avellana (<i>Corylus avellana L.</i>), Nuez de Brasil (<i>Bertholletia excelsa Humb. & Bonpl.</i>)
Olivo	<i>Olea europaea L.</i>
Colza y Mostaza	<i>Brassica napus L.</i> , <i>B. rapa L.</i>
Sésamo	<i>Sesamum indicum L.</i>
Aceite de algodón	<i>Gossypium hirsutum L.</i> , <i>G. herbaceum L.</i>
Verduras, otros (zanahoria, zapallo, lechuga, berenjena, etc.)	<i>Brassica oleracea L.</i> , <i>Daucus carota L.</i> , <i>Cucumis sativus L.</i> , <i>Cucurbita maxima Duchesne</i> , <i>Cucurbita moschata Duchesne</i> , <i>Cucurbita pepo L.</i> , <i>Lactuca sativa L.</i> , <i>Solanum melongena L.</i> , <i>Allium sativum L.</i> , <i>Spinacia oleracea L.</i> , <i>Cynara cardunculus L.</i>
Frutas, otros (melón, frutillas, damasco, pera, etc.)	<i>Citrullus lanatus Thunb.</i> , <i>Persea americana Mill.</i> , <i>Mangifera indica L.</i> , <i>Cucumis melo L.</i> <i>Carica papaya L.</i> , <i>Pyrus communis L.</i> , <i>Prunus persica (L.) Batsch</i> , <i>Prunus domestica L.</i> , <i>Ficus carica L.</i> , <i>Fragaria × ananassa</i> , <i>Prunus armeniaca L.</i> , <i>Prunus avium L.</i> , <i>Ribes nigrum L.</i>

Cultivo	Descripción – Cultivos y variedades incluidos
Bananas y plátanos	<i>Musa acuminata Colla, Musa balbisiana Colla</i>
Naranjas y mandarinas	<i>Citrus sinensis (L.) Osbeck</i>
Uva	<i>Vitis vinifera L.</i>
Manzana	<i>Malus domestica Borkh.</i>
Cebolla	<i>Allium cepa L.</i>
Ananá	<i>Ananas comosus (L.) Merr.</i>
Dátil	<i>Phoenix dactylifera L.</i>
Pomelo	<i>Citrus paradisi Macfad.</i>
Limón y lima	<i>Citrus limon (L.) Burm. f., C. aurantiifolia (Christm.) Swingle</i>
Cítricos, otros	-
Cacao	<i>Theobroma cacao L.</i>
Ají	<i>Capsicum annuum L., C. chinense Jacq., Pimenta dioica (L.) Merr.</i>
Café	<i>Coffea arabica L., C. canephora Pierre ex A. Froehner</i>
Especias, otros (jengibre, cardamomo, nuez moscada, etc.)	<i>Zingiber officinale Roscoe, Myristica fragrans Houtt., Amomum subulatum Roxb.</i>
Te y Yerba mate	<i>Camellia sinensis, Ilex paraguariensis</i>

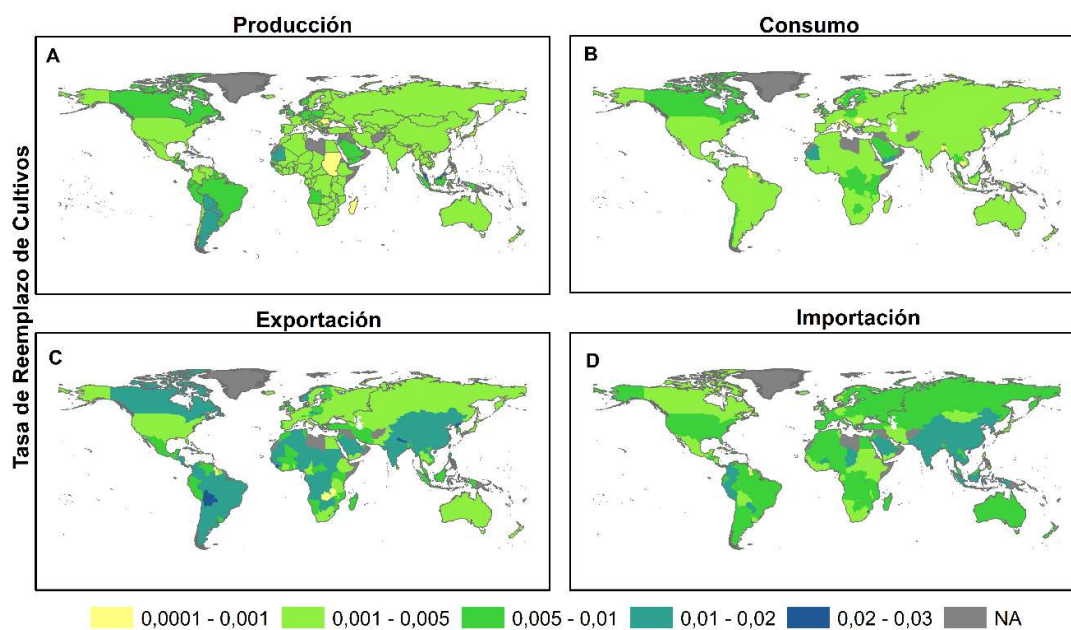


Figura Apéndice I.1. Tasa de reemplazo de cultivos para la (A) producción, (B) consumo, (C) exportación e (D) importación.

Apéndice II: Material suplementario del Capítulo 3

Lista de cultivos

achicoria	durazno	palma aceitera
ajo	esparrago	palta
alcaucil	espinaca	papaya
alfalfa	fonio	papaya
alforfón	frambuesa	pepino
algarroba	frijol	pera
almendra	frijol caupí	pimienta
alpiste	frutilla	pimiento
amapola	garbanzo	pistacho
ananá	girasol	plátano
anís	grosella	pomelo
arándano	guandú	quinoa
arándano rojo	guindo	raíz de taro
areca	haba	remolacha
arroz	higo	repollo
arveja	jengibre	sandía
avena	kiwi	lino
bambara	lechuga	sésamo
banana	lentejas	soja
batata	limón y lima	sorgo
berenjena	lupines	te
cacao	maíz	tomate
café	mandarina	trébol
canela	mandioca	trigo
caña de azúcar	mango	triticale
caqui	maní	uva
cártamo	manzana	vainilla
castaña	melón	vicia
castaña de cajú	membrillo	yaro
cebada	menta	zanahoria
cebolla	mijo	zapallo
centeno	mostaza	
cereza	nabo	
clavo de olor	nuez	
coco	nuez de Brasil	
coliflor	nuez de Kola	
colza	nuez moscada	
corinto	ñame	
damasco	ocra	
dátil	olivo	

Lista de países

Albania	Gambia	Nicaragua
Alemania	Ghana	Níger
Argelia	Grecia	Nigeria
Arabia Saudita	Guatemala	Pakistán
Argentina	Guinea	Palestina
Australia	Guinea-Bissau	Panamá
Austria	Guyana	Paraguay
Bangladesh	Holanda	Perú
Bielorrusia	Honduras	Polonia
Bélgica	Hungría	Portugal
Benín	India	Puerto Rico
Bután	Indonesia	Reino Unido
Bolivia	Irán	República Checa
Brasil	Iraq	Ruanda
Bulgaria	Irlanda	Rumania
Burkina Faso	Italia	Rusia
Camboya	Jamaica	Senegal
Camerún	Japón	Sierra Leona
Canadá	Jordania	Sri Lanka
Chad	Kazakstán	Suazilandia
Chile	Kenia	Sudáfrica
China	Lao	Sudán
Colombia	Lesoto	Suecia
Congo	Líbano	Tailandia
Costa de Marfil	Lituania	Tanzania
Cuba	Madagascar	Togo
Ecuador	Malasia	Túnez
Egipto	Malawi	Turquía
El Salvador	Malasia	Ucrania
Eritrea	Marruecos	Uganda
Eslovaquia	Mauritius	Uruguay
España	México	Venezuela
Estados Unidos	Mozambique	Vietnam
Etiopía	Myanmar	Zambia
Filipinas	Namibia	Zimbabue
Francia	Nepal	

Cuadro Apéndice II.1. Variables utilizadas en el análisis. CV indica coeficiente de variación.

Variable	Resolución espacial	Unidad	Fuente de información	Comentarios
Diversidad de cultivos	0.0833°	-	http://www.earthstat.org/	
Riqueza de plantas vasculares	1°	Número	Kreft y Jetz 2007	
Área	0.0833°	-	http://www.earthstat.org/	Fracción del píxel cultivada
Precipitación media anual	0.167°	mm	http://www.worldclim.org/	
CV de la precipitación	0.167°	-	http://www.worldclim.org/	Se usó la versión 2.0
Temperatura media anual	0.167°	°C	http://www.worldclim.org/	Se usó la versión 2.0
Desvío estándar de la precipitación	0.167°	-	http://www.worldclim.org/	Se usó la versión 2.0
Índice de aridez	0.00833°	Sin unidad	http://csi.cgiar.org/Aridity/	Se usó la versión 2.0
Evapotranspiración potencial	0.00833°	mm	http://csi.cgiar.org/Aridity/	
Pendiente topográfica	0.05°	Grados	http://www.earthenv.org	
Carbono orgánico del suelo	0.00833°	g kg ⁻¹	https://soilgrids.org/	Entre 0 y 30 cm
Densidad de población	0.5°	hab. km ²	http://sedac.ciesin.columbia.edu	
PBI per cápita	0.0833°	USD hab ⁻¹	https://www.nature.com/articles/sdata20184	
Índice de desarrollo humano	0.0833°	-	https://www.nature.com/articles/sdata20184	
Idiomas	Vector	Idiomas por píxel	http://landscape.umd.edu/map.php	El vector fue grillado
Aislamiento	0.00833°	Horas	http://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/gam/	
Tamaño de lote	0.00833°	ha	https://www.geo-wiki.org/downloads/	
Agricultura 1700	0.0833°	-	http://ecotope.org	Fracción del píxel cultivada en 1700
Empleo agrícola	Escala nacional	-	https://data.worldbank.org/	Proporción sobre el empleo total
PBI agrícola	Escala nacional	-	https://data.worldbank.org/	Proporción sobre el PBI total
Exportaciones netas	Escala nacional	-	http://www.fao.org/faostat/en/	
Nitrógeno	0.0833°	kg ha ⁻¹	http://www.earthstat.org/	
Riego	0.0833°	ha por píxel	https://mygeohub.org/publications/8/2	Área equipada con riego
Tractores	Escala nacional	Tractores por país	http://www.fao.org/faostat/en/	

Cuadro Apéndice II.2. Matriz de correlación de variables para el Nuevo Mundo. Los colores indican el signo de la correlación (azul positivo, rojo negativo) y su intensidad la fuerza de la correlación. Los valores estadísticamente significativos (valor $p < 0,05$) se remarkan en negrita.

	1 - Longitud	2 - Latitud	3 - Diversidad	4 - Riqueza	5 - Equitatividad	6 - Precipitación (media)	7 - Precipitación (cv)	8 - Temperatura (media)	9 - Temperatura (sd)	10 - Aridez	11 - Evapotranspiración	12 - Pendiente	13 - COS	14 - Riqueza vasculares	15 - Densidad de población	16 - PBI per capita	17 - IDH	18 - Aislamiento	19 - Riqueza idiomas	20 - Tamaño de lote	21 - Nitrógeno	22 - Riego	23 - Área	24 - Agricultura 1700	25 - Exportaciones netas	26 - Empleo agrícola	27 - PBI agrícola	28 - Tractores
1 - Longitud	1																											
2 - Latitud	-0.67	1																										
3 - Diversidad	0.05	-0.15	1																									
4 - Riqueza	0.62	-0.50	0.30	1																								
5 - Equitatividad	-0.09	-0.02	0.96	0.05	1																							
6 - Precipitación (media)	-0.05	-0.36	0.06	-0.04	0.06	1																						
7 - Precipitación (cv)	-0.24	0.07	0.12	-0.02	0.13	-0.11	1																					
8 - Temperatura (media)	0.34	-0.69	0.06	0.26	-0.01	0.62	0.17	1																				
9 - Temperatura (sd)	-0.35	0.76	-0.18	-0.36	-0.10	-0.62	-0.23	-0.91	1																			
10 - Aridez	-0.20	-0.06	0.04	-0.17	0.07	0.87	-0.32	0.23	-0.25	1																		
11 - Evapotranspiración	0.34	-0.68	0.02	0.31	-0.05	0.51	0.28	0.96	-0.88	0.08	1																	
12 - Pendiente	-0.07	-0.08	0.24	0.22	0.19	0.29	0.30	0.26	-0.46	0.20	0.29	1																
13 - COS	-0.32	0.42	0.23	-0.07	0.26	0.04	-0.14	-0.44	0.31	0.36	-0.50	0.14	1															
14 - Riqueza vasculares	0.04	-0.38	0.21	0.10	0.19	0.75	0.14	0.67	-0.76	0.55	0.59	0.63	0.00	1														
15 - Densidad de población	-0.09	0.03	0.07	0.06	0.05	0.19	0.03	0.14	-0.18	0.19	0.11	0.21	0.12	0.26	1													
16 - PBI per capita	-0.09	0.67	-0.26	-0.23	-0.20	-0.59	-0.30	-0.68	0.82	-0.29	-0.70	-0.41	0.18	-0.67	-0.11	1												
17 - IDH	0.11	0.45	-0.20	-0.05	-0.19	-0.68	-0.35	-0.70	0.79	-0.40	-0.66	-0.48	0.08	-0.77	-0.17	0.91	1											
18 - Aislamiento	0.19	-0.05	0.06	0.11	0.04	-0.15	0.07	-0.09	0.04	-0.20	-0.03	0.10	0.09	-0.08	-0.30	0.02	0.06	1										
19 - Riqueza idiomas	-0.09	0.01	0.07	0.17	0.02	0.23	0.08	0.10	-0.16	0.18	0.11	0.35	0.12	0.24	0.13	-0.20	-0.25	0.07	1									
20 - Tamaño de lote	0.16	0.01	-0.17	-0.09	-0.15	-0.45	-0.17	-0.37	0.44	-0.41	-0.31	-0.54	-0.18	-0.60	-0.33	0.39	0.52	0.17	-0.26	1								
21 - Nitrógeno	-0.36	0.41	0.23	-0.05	0.24	0.09	0.01	-0.16	0.19	0.22	-0.15	0.11	0.20	0.02	0.13	0.23	0.08	-0.24	0.04	-0.24	1							
22 - Riego	-0.13	0.11	0.11	0.01	0.11	-0.11	0.12	0.10	-0.03	-0.19	0.14	0.04	-0.11	0.00	0.07	0.10	0.04	-0.11	-0.02	-0.04	0.33	1						
23 - Área	-0.13	0.19	-0.21	-0.10	-0.20	-0.15	-0.10	-0.32	0.38	-0.01	-0.31	-0.29	-0.04	-0.28	-0.09	0.25	0.29	-0.18	-0.12	0.29	0.04	0.00	1					
24 - Agricultura 1700	-0.06	-0.04	0.22	0.19	0.17	0.21	0.25	0.21	-0.25	0.14	0.20	0.27	0.06	0.36	0.18	-0.24	-0.28	0.00	0.13	-0.32	0.16	0.13	-0.08	1				
25 - Exportaciones netas	0.38	-0.12	0.06	0.18	0.01	-0.47	-0.38	-0.42	0.41	-0.34	-0.42	-0.44	0.04	-0.54	-0.26	0.38	0.58	0.21	-0.22	0.58	-0.32	-0.15	0.18	-0.20	1			
26 - Empleo agrícola	0.06	-0.41	0.21	0.11	0.19	0.65	0.31	0.65	-0.77	0.41	0.61	0.52	-0.07	0.80	0.19	-0.73	-0.84	0.00	0.23	-0.51	-0.04	-0.04	-0.28	0.31	-0.61	1		
27 - PBI agrícola	0.19	-0.61	0.36	0.25	0.31	0.53	0.16	0.61	-0.73	0.29	0.57	0.44	-0.10	0.68	0.11	-0.77	-0.74	0.14	0.17	-0.35	-0.22	-0.10	-0.22	0.35	-0.14	0.74	1	
28 - Tractores	-0.39	0.63	-0.41	-0.58	-0.28	-0.24	-0.24	-0.40	0.60	-0.04	-0.40	-0.28	-0.05	-0.38	-0.04	0.69	0.56	-0.16	-0.15	0.14	0.32	0.20	0.21	-0.17	-0.04	-0.53	-0.62	1

Cuadro Apéndice II.3. Matriz de correlación de variables para el Viejo Mundo. Los colores indican el signo de la correlación (azul positivo, rojo negativo) y su intensidad la fuerza de la correlación. Los valores estadísticamente significativos (valor $p < 0,05$) se remarkan en negrita.

	1 - Longitud	2 - Latitud	3 - Diversidad	4 - Riqueza	5 - Equitatividad	6 - Precipitación (media)	7 - Precipitación (cv)	8 - Temperatura (media)	9 - Temperatura (sd)	10 - Aridez	11 - Evapotranspiración	12 - Pendiente	13 - COS	14 - Riqueza vasculares	15 - Densidad de población	16 - PBI per capita	17 - IDH	18 - Aislamiento	19 - Riqueza idiomas	20 - Tamaño de lote	21 - Nitrógeno	22 - Riego	23 - Área	24 - Agricultura 1700	25 - Exportaciones netas	26 - Empleo agrícola	27 - PBI agrícola	28 - Tractores
1 - Longitud	1.0																											
2 - Latitud	-0.14	1.0																										
3 - Diversidad	0.00	0.13	1.0																									
4 - Riqueza	0.45	0.23	0.43	1.0																								
5 - Equitatividad	-0.19	0.03	0.91	0.03	1.0																							
6 - Precipitación (media)	0.34	-0.54	-0.06	-0.16	0.03	1.0																						
7 - Precipitación (cv)	0.30	-0.48	-0.11	0.02	-0.12	0.05	1.0																					
8 - Temperatura (media)	0.07	-0.84	-0.14	-0.29	-0.02	0.50	0.59	1.0																				
9 - Temperatura (sd)	0.19	0.80	0.04	0.44	-0.16	-0.59	-0.26	-0.84	1.0																			
10 - Aridez	0.27	-0.11	0.05	-0.06	0.10	0.84	-0.28	0.05	-0.27	1.0																		
11 - Evapotranspiración	0.04	-0.84	-0.19	-0.29	-0.07	0.31	0.70	0.94	-0.73	-0.18	1.0																	
12 - Pendiente	0.15	-0.17	0.21	0.25	0.13	0.23	-0.04	0.02	-0.17	0.24	0.01	1.0																
13 - COS	0.11	0.36	-0.06	-0.18	0.02	0.17	-0.41	-0.42	0.24	0.45	-0.47	-0.04	1.0															
14 - Riqueza vasculares	0.27	-0.47	0.10	0.09	0.09	0.72	-0.13	0.34	-0.50	0.61	0.19	0.52	0.04	1.0														
15 - Densidad de población	0.27	-0.12	0.05	0.15	-0.01	0.18	0.19	0.22	-0.10	0.12	0.13	-0.07	-0.13	0.08	1.0													
16 - PBI per capita	-0.41	0.45	0.08	-0.05	0.10	-0.19	-0.51	-0.39	0.15	0.11	-0.47	-0.04	0.23	-0.12	-0.08	1.0												
17 - IDH	-0.19	0.69	0.16	0.16	0.08	-0.23	-0.72	-0.68	0.46	0.17	-0.78	-0.05	0.34	-0.11	-0.09	0.75	1.0											
18 - Aislamiento	0.24	-0.35	-0.07	-0.01	-0.06	0.28	0.11	0.17	-0.20	0.15	0.22	0.36	0.12	0.31	-0.24	-0.27	-0.32	1.0										
19 - Riqueza idiomas	-0.06	-0.33	-0.04	-0.21	0.06	0.31	0.23	0.35	-0.36	0.14	0.34	0.15	-0.08	0.19	-0.01	-0.20	-0.34	0.17	1.0									
20 - Tamaño de lote	-0.29	0.60	-0.17	-0.14	-0.15	-0.42	-0.55	-0.67	0.55	-0.15	-0.62	-0.30	0.35	-0.37	-0.31	0.35	0.57	-0.18	-0.26	1.0								
21 - Nitrógeno	0.48	0.06	0.43	0.71	0.17	0.04	0.12	-0.03	0.15	0.14	-0.12	0.15	-0.17	0.13	0.33	0.04	0.12	-0.06	-0.16	-0.36	1.0							
22 - Riego	0.30	-0.10	-0.01	0.19	-0.11	0.00	0.34	0.29	-0.02	-0.14	0.26	-0.15	-0.27	-0.09	0.49	-0.16	-0.17	-0.22	-0.03	-0.31	0.36	1.0						
23 - Área	0.14	-0.06	-0.05	0.08	-0.10	0.05	0.24	0.25	-0.07	-0.07	0.19	-0.28	-0.24	-0.11	0.47	-0.13	-0.12	-0.30	0.00	-0.21	0.24	0.66	1.0					
24 - Agricultura 1700	-0.07	0.17	0.22	0.27	0.12	-0.12	-0.06	-0.03	0.07	-0.07	-0.10	-0.22	-0.19	-0.10	0.39	0.18	0.17	-0.36	-0.10	-0.08	0.35	0.37	0.46	1.0				
25 - Exportaciones netas	0.12	-0.02	-0.09	0.10	-0.14	0.06	0.01	0.00	0.02	0.00	-0.01	-0.13	0.01	0.04	-0.03	-0.15	-0.04	0.06	0.05	0.06	0.06	0.03	0.13	0.09	1.0			
26 - Empleo agrícola	0.30	-0.70	-0.13	-0.10	-0.07	0.34	0.72	0.70	-0.50	-0.05	0.76	0.10	-0.36	0.20	0.17	-0.70	-0.90	0.31	0.33	-0.66	-0.01	0.24	0.19	-0.14	0.11	1.0		
27 - PBI agrícola	0.03	-0.62	-0.14	-0.30	0.00	0.24	0.63	0.67	-0.52	-0.13	0.75	0.02	-0.35	0.10	0.06	-0.60	-0.87	0.25	0.35	-0.52	-0.21	0.12	0.10	-0.14	0.06	0.85	1.0	
28 - Tractores	0.27	0.13	0.20	0.33	0.04	0.00	0.26	0.06	0.10	0.01	-0.01	-0.03	0.00	-0.16	0.22	0.06	0.08	-0.23	-0.04	-0.19	0.32	0.32	0.31	0.24	0.11	0.03	-0.16	1.0

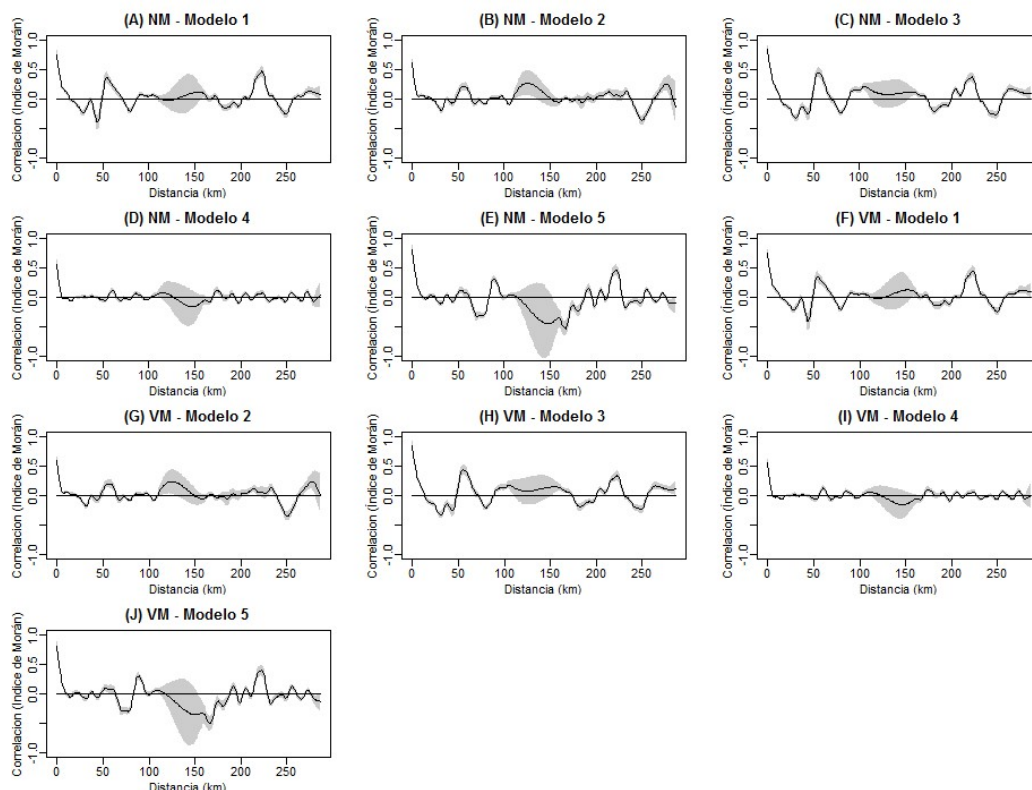


Figura Apéndice II.1. Análisis de autocorrelación espacial para el Nuevo (A-E) y Viejo (G-J) Mundo. Los correlogramas representan el índice de correlación de Morán en función de la distancia en kilómetros y fueron construidos en base a los residuales de los siguientes modelos (se ajustaron modelos separados para Nuevo y Viejo Mundo): A y F: Regresión simple ajustada mediante mínimos cuadrados ordinarios sin incluir variables predictoras (modelo nulo); (B - G) Regresión múltiple ajustada mediante mínimos cuadrados ordinarios incluyendo las 14 variables predictoras, (C - H) Regresión múltiple ajustada mediante mínimos cuadrados generalizados incluyendo las 14 variables predictoras y el modelado de la autocorrelación espacial (con diferentes estructuras de correlación), (D - I) Regresión múltiple de efectos mixtos incluyendo como efecto fijo las 14 variables predictoras y país como efecto aleatorio (diferente ordenada al origen según país), (E - J) Regresión múltiple de efectos mixtos incluyendo como efecto fijo las 14 variables predictoras y como efecto aleatorio el país (diferente ordenada al origen según país) y el modelado de la autocorrelación espacial (con diferentes estructuras de correlación). Para los modelos D-I y E-J la estructura de correlación con mejor ajuste y, por ende utilizada, fue la exponencial.

Cuadro Apéndice II.4. Coeficientes de los determinantes según región (Viejo y Nuevo Mundo) derivados de modelos de efectos mixtos con el determinante como efecto fijo y país como efecto aleatorio. (*) indica que el determinante es a nivel de país.

Determinante	Coeficiente	
	Viejo Mundo	Nuevo Mundo
Area	-0,06	-0,064
Precipitación (media)	-0,008	-0,004
Precipitación (cv)	-0,065	0,0326
Temperatura (media)	-0,135	0,124
Temperatura (sd)	0,047	0,004
Evapotranspiración	-0,113	0,097
Índice de aridez	0,0189	-0,006
Pendiente topográfica	0,034	0,003
Carbono orgánico del suelo	0,0115	-0,03
Densidad de población	0,001	0,002
PBI per capita	0,033	0,057
Índice de desarrollo humano	0,0072	0,093
Tamaño de lote	-0,0105	-0,011
Aislamiento	0,0118	-0,018
Idiomas	0,0172	-0,0181
Agricultura en 1700	-0,0068	0,0002
PBI agropecuario (*)	-0,1116	0,023
Empleo agrícola (*)	-0,143	0,207
Exportaciones netas (*)	-0,043	-0,255
Nitrógeno	0,111	0,132
Riego	-0,044	0,047
Tractores (*)	0,148	-0,479

Apéndice III: Material suplementario del Capítulo 4

Lista de cultivos

Argentina	Brasil	Paraguay
Arroz	Arroz	Arroz
Avena	Avena	Colza
Caña de azúcar	Caña de azúcar	Caña de azúcar
Cebada	Centeno	Girasol
Centeno	Cebada	Maíz
Colza	Girasol	Maní
Girasol	Maíz	Soja
Maíz	Maní	Sorgo
Maní	Soja	Trigo
Sorgo	Sorgo	
Trigo	Trigo	

Para Argentina, Trigo incluye “Trigo” y “Trigo candeal”. Para Paraguay, Arroz incluye “Arroz con riego” y “Arroz sin riego”.

Cuadro Apéndice III.I. Variables utilizadas en el análisis. En todos los casos que había información grillada se promediaron todos los píxeles contenidos dentro de la unidad territorial. “Proporción transformada” refiere a la proporción del píxel que en el año 2000 era agricultura o ganadería. La tasa anual de deforestación se calculó con la fórmula propuesta por FAO (Puyravaud 2003). Para “Puertos” se calculó la distancia desde el centroide de la unidad territorial hasta el puerto más cercano. Para “Rutas” se calculó la densidad de rutas al sumar la longitud total de rutas por unidad territorial y dividirla por su superficie.

Variable	Resolución espacial	Unidad	Fuente de información	Comentarios
Agricultura Argentina	Departamento	ha, kg ha ⁻¹ , kg	https://www.agroindustria.gob.ar/datosabiertos/	
Agricultura Brasil	Microregión	ha, kg ha ⁻¹ , kg	https://sidra.ibge.gov.br	
Agricultura Paraguay	Departamento	ha, kg ha ⁻¹ , kg	http://www.mag.gov.py	
Ganadería Argentina	Departamento	Existencias	https://www.argentina.gob.ar/senasa	
Ganadería Brasil	Microregión	Existencias	https://sidra.ibge.gov.br	
Ganadería Paraguay	Departamento	Existencias	http://www.mag.gov.py	
Precipitación media anual	0,00833°	mm	http://www.worldclim.org/	Se usó la versión 2.0
Temperatura media anual	0,00833°	°C	http://www.worldclim.org/	Se usó la versión 2.0
Proporción transformada	0,00833°	mm	http://www.earthstat.org/	Se sumó la superficie agrícola y ganadera
Pendiente topográfica	0,05°	Grados	http://www.earthenv.org	
Deforestación	30 metros	Tasa anual	https://earthenginepartners.appspot.com	Se extrajeron los valores desde Google Earth Engine
Densidad de población	0,5°	hab. km ²	http://sedac.ciesin.columbia.edu	
PBI per cápita	0,0833°	USD hab-1	https://www.nature.com/articles/sdata20184	
Puertos	Vector	km	https://trase.earth/	Se calculó la distancia al puerto más cercano
Rutas	Vector	km km ²	http://sedac.ciesin.columbia.edu	
Tamaño de lote	0,00833°	ha	https://www.geo-wiki.org/downloads/	

Cuadro Apéndice III.2. Cambios de la producción de granos y de las existencias de ganado vacuno en Argentina, Brasil y Paraguay entre el inicio y fin del período analizado. Para el inicio se promediaron los valores del 2002-2004 y para el fin del 2013-2015. Para cada país y período, el área cosechada total está expresada en millones de hectáreas, mientras que los cultivos se expresan como proporción de este valor. Los cambios (Δ) son el cociente entre el valor final y el inicial. El cambio de cada cultivo entre períodos está calculado sobre los valores absolutos de superficie sembrada que se obtienen al multiplicar la fracción de cada cultivo por el área total sembrada del mismo período. Mha y MTn, indican millones de hectáreas y toneladas, respectivamente.

	Área (Mha - Proporción)			Rendimiento (Tn/ha)			Producción (MTn/Cabezas)		
	2002-2004	2013-2015	Δ Área	2002-2004	2013-2015	Δ Rend.	2002-2004	2013-2015	Δ Prod.
Argentina	24,72	32,20	1,30	2,67	3,28	1,23	65,92	105,72	1,60
Arroz	0,01	0,004	0,81	5,93	6,45	1,09	0,91	0,81	0,88
Trigo	0,24	0,13	0,72	2,43	2,79	1,15	14,14	11,68	0,83
Maíz	0,10	0,15	2,06	6,90	7,22	1,05	16,42	35,46	2,16
Soja	0,54	0,60	1,44	2,57	2,99	1,16	34,45	57,77	1,68
Vacunos	-	-	-	-	-	-	57,10	47,80	0,84
Brasil	38,80	52,20	1,35	2,74	3,61	1,32	106,26	188,39	1,77
Arroz	0,09	0,04	0,68	3,36	5,26	1,57	11,35	12,09	1,06
Trigo	0,06	0,05	1,01	2,00	2,32	1,16	5,03	5,84	1,16
Maíz	0,33	0,30	1,23	3,27	5,18	1,58	47,86	81,81	1,71
Soja	0,48	0,58	1,60	2,54	2,94	1,16	42,02	88,65	2,11
Vacunos	-	-	-	-	-	-	195,10	213,00	1,09
Paraguay	2,66	5,12	1,92	2,15	2,89	1,35	5,72	14,82	2,59
Arroz	0,002	0,00	0,36	1,75	1,93	1,11	0,01	0,003	0,40
Trigo	0,13	0,11	1,68	2,05	1,86	0,91	0,68	1,04	1,52
Maíz	0,17	0,18	1,96	2,40	4,92	2,05	1,11	4,45	4,02
Soja	0,66	0,68	1,96	2,22	2,69	1,21	3,93	9,33	2,38
Vacunos	-	-	-	-	-	-	9,50	14,10	1,48
Total	61,82	84,28		2,88	3,67	1,27	177,90	308,93	1,74
Arroz	0,06	0,03	0,69	3,47	5,31	1,53	12,27	12,90	1,05
Trigo	0,14	0,09	0,84	2,29	2,56	1,11	19,85	18,55	0,93
Maíz	0,25	0,26	1,38	4,17	5,63	1,35	65,39	121,72	1,86
Soja	0,55	0,63	1,56	2,37	2,94	1,24	80,39	155,76	1,94
Vacunos	-	-	-	-	-	-	261,70	274,90	1,05

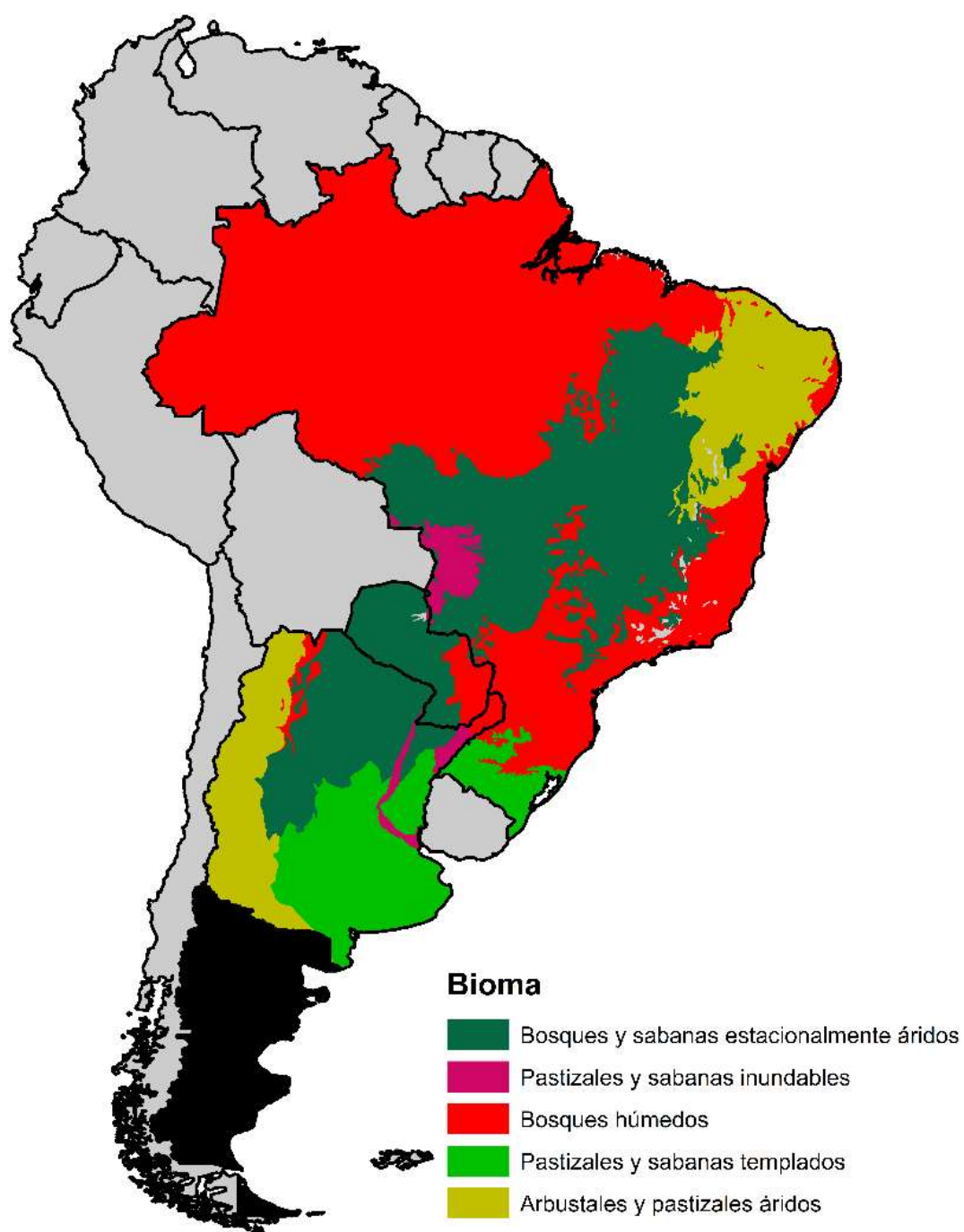


Figura Apéndice III.1. Biomas de los países analizados. Patagonia se encuentra en negro porque no fue incluida en el análisis. Los biomas fueron cartografiados en base a Olson et al. (2001) aunque modificados para reducir la cantidad.

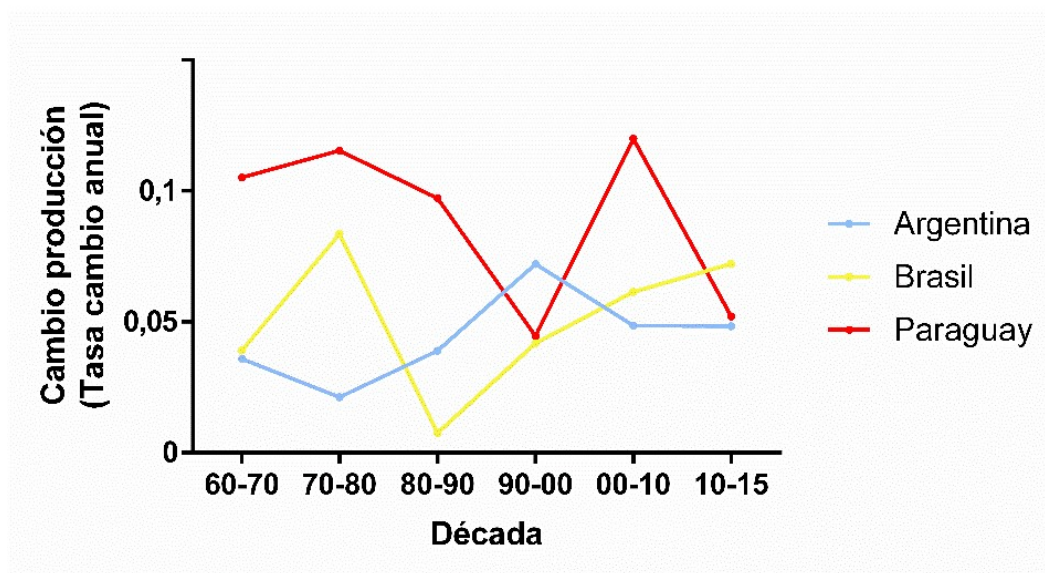


Figura Apéndice III.2. Cambio en la producción agrícola entre décadas según país. El cambio en la producción agrícola representa la tasa de cambio anual calculada como $[(V_f/V_i)^{1/t}-1]$, siendo V_f y V_i el valor al fin y al inicio de la década, respectivamente, y t la cantidad de años transcurridos entre el valor al fin y al inicio. Los valores de producción (kg) fueron tomados de FAOSTAT y representan la producción agregada de los principales cultivos extensivos (arroz, maíz, soja y trigo).