

Revelando las dinámicas de control territorial en fronteras agrícolas emergentes

Olivia del Giorgio^{a,1}, Matthias Baumann^b, Tobias Kuemmerle^{b,c} y Yann le Polain de Waroux^{a,d}

a) Department of Geography, McGill University, Montréal, QC H3A 0E6, Canada

b) Geography Department, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin 10099, Germany

c) Integrative Research Institute on Transformations in Human-Environment Systems, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin 10099, Germany

d) Institute for the Study of International Development, McGill University, Montréal, QC H3A 0E6, Canada

1 Autora de correspondencia. Correo: olivia.delgiorgio@mail.mcgill.ca

Esta es una versión traducida del inglés por la IA; por favor citar el artículo original:

del Giorgio, Olivia, Matthias Baumann, Tobias Kuemmerle, and Yann le Polain de Waroux. "Revealing land control dynamics in emerging agricultural frontiers." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, no. 23 (2025): e2407916122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2407916122>

Significancia

La expansión de la agricultura de *commodities* es el principal motor de la deforestación a nivel mundial, lo que hace crucial que la capturemos con precisión. Sin embargo, la forma en que monitoreamos las fronteras agrícolas de *commodities* generalmente pasa por alto las dinámicas tempranas de apropiación de tierras que preceden a la deforestación. Como resultado, las fronteras agrícolas solo se vuelven visibles cuando ya es demasiado tarde. Aquí desarrollamos un enfoque para mapear la apropiación de tierras y lo aplicamos al Gran Chaco, un foco de deforestación a escala global. Revelamos que la apropiación de tierras se extiende mucho más allá de los frentes de deforestación y hacia lo que parecerían ser bosques intactos. Nuestro enfoque puede servir como herramienta para la orientación de políticas destinadas a proteger los bosques secos y las numerosas personas que dependen de ellos.

Resumen. La expansión de la agricultura de *commodities* hacia los bosques tropicales y subtropicales degrada la funcionalidad de los ecosistemas, la biodiversidad y los medios de subsistencia de millones de personas. Comprender dónde y cómo emergen las fronteras agrícolas es, por tanto, de suma importancia. Sin embargo, los enfoques de monitoreo existentes se centran principalmente en mapear la deforestación y no capturan los cambios en el acceso a la tierra y la propiedad que sientan las bases para la expansión agrícola, omitiendo así las etapas tempranas del desarrollo de las fronteras. Desarrollamos un enfoque que capta estas dinámicas tempranas y lo aplicamos a la totalidad del Chaco, con sus 1,1 millones de km², un foco de deforestación a escala global. Mediante la detección de elementos lineales indicativos de apropiaciones de tierras y el análisis de sus dinámicas espaciotemporales, revelamos que la huella de las fronteras agrícolas en la región se extiende mucho más allá que la del desmonte. La mayor parte del Chaco muestra indicios de apropiación de tierras y, si bien dicha actividad se concentra especialmente en las proximidades de zonas de desmonte activo, la apropiación emergente en áreas remotas del Chaco boliviano y paraguayo indica un interés creciente y acelerado por la tierra en estas regiones. Finalmente, la fuerte correlación espacial entre la apropiación de tierras y la desaparición de los puestos de pequeños productores señala las repercusiones sociales de las etapas tempranas de la expansión de las fronteras agrícolas en el Chaco. Al ofrecer una plantilla transferible para mapear indicadores de control territorial a escala, nuestro enfoque permite una mejor comprensión de los procesos de expansión de fronteras y una orientación más precisa de las intervenciones de política en fronteras agrícolas emergentes a nivel global.

Palabras clave: control territorial | fronteras agrícolas de *commodities* | deforestación | apropiación de tierras

Los pronósticos sobre las catastróficas consecuencias sociales, ecológicas y climáticas que probablemente resultarán de la continua pérdida de bosques han dado lugar a una intensificación de los esfuerzos globales para combatir la deforestación (1–3). Iniciativas multisectoriales como la Declaración de Nueva York sobre los Bosques y la Declaración de Glasgow sobre Bosques y Uso de la Tierra, ambas de las cuales implican compromisos de los líderes mundiales para poner fin a la deforestación antes de 2030 (4, 5), han ido acompañadas de un número creciente de compromisos empresariales en favor de cadenas de suministro libres de deforestación (6, 7). Sin embargo, a pesar de los compromisos cada vez más extendidos tanto del sector público como del privado, la pérdida de bosques tropicales se aceleró entre 2020 y 2023 (8), y varias regiones reconocidas como críticas para la conservación y los esfuerzos de mitigación del cambio climático han experimentado recientemente las mayores tasas de deforestación desde el cambio de siglo (9).

Si bien múltiples factores contribuyen a estas tendencias (10–12), el principal motor de la deforestación global es la expansión de la agricultura industrializada (13), tal como ha sido el caso durante más de cuatro décadas (14). En particular, un puñado de *commodities* —concretamente la carne vacuna, el aceite de palma y la soja— da cuenta de una gran proporción de toda la pérdida forestal vinculada a la agricultura (15). Los impactos asociados a la demanda de tierras para estas *commodities* afectan a ciertas regiones más que a otras (16–18), debido no solo a su aptitud para la agricultura, sino también frecuentemente a las condiciones sociales subyacentes de pobreza, marginación y corrupción que permiten que los sistemas sociales y ecológicos existentes sean desplazados con relativa facilidad (19, 20). La necesidad de restricciones más estrictas a la deforestación es apremiante, no menos porque la deforestación inflige daños de manera desproporcionada sobre las poblaciones más vulnerables del mundo (21–23).

Por lo tanto, es esencial comprender las dinámicas de expansión de las fronteras agrícolas de *commodities* hacia los bosques tropicales y subtropicales del mundo. Hasta la fecha, la caracterización de estas dinámicas ha descansado principalmente en la detección del desmonte para cultivos y pasturas (24–26). Sin embargo, estos datos no capturan los cambios en el control territorial y, por tanto, pasan por alto los cambios en el acceso a la tierra y la propiedad de los recursos que sientan las bases para la conversión del bosque a usos agrícolas (27, 28). En cambio, capturan la expansión agrícola en una etapa tardía, cuando en la mayoría de los casos ya es demasiado tarde para intervenir. Nuestro objetivo fue desarrollar un enfoque para mapear los cambios en el control territorial asociados a las etapas tempranas del desarrollo de las fronteras agrícolas —abriendo así la posibilidad de intervenir antes de que ocurra la deforestación a gran escala y de que se produzcan los marcados impactos socioecológicos a ella asociados.

Demostramos nuestro enfoque en el Chaco, una ecorregión forestal tropical y subtropical seca que se extiende por 1,1 millones de km² entre Argentina, Bolivia y Paraguay, y que constituye actualmente un foco de deforestación vinculada a la agricultura de *commodities* (26, 29, 30). En la región, las demarcaciones forestales lineales —consistentes en estrechas franjas de bosque desmontado— son utilizadas por distintos actores para reclamar el uso exclusivo de tierras boscosas, con miras generalmente a su conversión eventual a pasturas para ganadería o a tierras de cultivo para la producción de soja (31–33). Estas demarcaciones lineales tienen validez jurídica en los procesos de titulación de tierras, tanto como marcadores de los límites de la propiedad como en calidad de prueba del "uso productivo" de las tierras forestales (34–36). Por ello, aprovechamos las demarcaciones forestales emergentes como indicadores de los cambios en el control territorial que ocurren en una región donde, tradicionalmente, las tierras han

sido gestionadas de forma comunal o bajo acceso abierto por pequeños productores indígenas y no indígenas (37, 38). El mapeo de las demarcaciones forestales para el año 2020 y el seguimiento del momento en que estas demarcaciones emergieron en todo el Chaco nos permitieron evaluar la distribución y las dinámicas temporales de la apropiación de tierras en áreas forestadas, relacionar dicha apropiación con el desmonte, y examinar la superposición entre la presión de apropiación y la desaparición de los puestos dispersos de pequeños productores —en síntesis, evaluar las dinámicas e impactos asociados a las etapas tempranas de expansión de las fronteras de *commodities*.

1. Resultados

1.1. Mapeo de Demarcaciones Forestales

A diferencia de los límites de campos y las características de rutas (39, 40), las demarcaciones forestales presentan una firma espectral variable, lo que dificulta su detección. La clave para superar este desafío fue el uso del análisis morfológico de imágenes Sentinel-2 para aislar elementos en función de su forma (comúnmente de varios kilómetros de longitud y entre 5 y 25 m de ancho), combinado con aprendizaje automático supervisado como método para agrupar elementos discontinuos en estructuras significativas (41). Una vez detectados los elementos lineales para el año 2020 en toda la región, se aislaron las demarcaciones forestales mediante el enmascaramiento de elementos lineales irrelevantes, como rutas y cursos de agua. Para examinar la dinámica temporal de las demarcaciones mapeadas, se extrajo el año de aparición de cada segmento de demarcación entre 1986 y 2020 utilizando una serie temporal de imágenes Landsat (42). El enfoque general adoptado consistió, por lo tanto, en cuatro etapas principales: 1) delineación de elementos, 2) aislamiento de demarcaciones, 3) datación de demarcaciones, y 4) análisis de la dinámica de la frontera (SI Appendix, Fig. S1).

Para el año 2020, se detectaron más de 290.000 km de demarcaciones forestales en todo el Chaco. Un análisis de correspondencia lineal entre las demarcaciones extraídas automáticamente y las mapeadas manualmente indicó una completitud general del conjunto de datos del 69% (es decir, la cobertura alcanzada por el proceso de extracción) y una corrección del 86% (es decir, el porcentaje de elementos extraídos que corresponden a un elemento de referencia). La completitud aumentó al 84% en los elementos de referencia que etiquetamos manualmente como "ciertamente" demarcaciones (es decir, líneas anchas, claras e ininterrumpidas), lo que indica que el método detectó de manera confiable las demarcaciones forestales realizadas por actores agroindustriales, que tienden a superar los 10 m de ancho y son desmontadas con maquinaria pesada. La mayor precisión de detección se obtuvo para el Chaco Seco boliviano, con una completitud general del 91%, y la menor para el Chaco Seco argentino (completitud general del 60%, aunque con una corrección del 85%; SI Appendix, Table S5). En cuanto a la precisión de la fecha de aparición detectada, se encontró que la desviación promedio respecto de las demarcaciones de referencia fechadas manualmente fue de 2 años o menos (SI Appendix, Table S6).

1.2. Distribución y Dinámica de la Apropiación de Tierras en el Gran Chaco

Para evaluar la distribución de la apropiación de tierras¹ en el Gran Chaco para el año 2020, se calculó la longitud total de las demarcaciones en áreas boscosas dividida por la superficie total de bosque dentro de celdas de grilla de 10 km (Materiales y Métodos y Sección 3.3). El mapeo de esta métrica de densidad a lo largo del Chaco reveló que, del área boscosa remanente en 2020 (~66% de la superficie total), una porción significativa (30%) presentaba niveles medios a muy altos de apropiación de tierras, correspondientes a más de ~3 km de demarcaciones por cada 100 km² de bosque. Estas áreas se localizaban principalmente en la porción más septentrional del Chaco boliviano, en el oeste del Paraguay y en el Chaco argentino central y septentrional (Fig. 1 A y B). Una gran proporción (37%) de los bosques secos remanentes fue clasificada como de densidad de apropiación muy baja (1,5 km o menos por 100 km² de bosque). Las áreas protegidas, aunque representaban una pequeña fracción del Chaco boscoso (~15%), contenían el 25% de estas áreas de densidad de apropiación muy baja (SI Appendix, Fig. S19), al tiempo que concentraban muy pocas (2%) celdas de grilla clasificadas como de densidad de apropiación alta a muy alta (es decir, más de 5 km de demarcaciones por 100 km² de bosque). Fuera de las áreas protegidas, las celdas con densidad de apropiación muy baja se localizaban mayormente en zonas de menor aptitud agrícola (SI Appendix, Fig. S20).

Para caracterizar la dinámica temporal de la apropiación de tierras, se derivaron tres métricas adicionales para cada celda de grilla: 1) velocidad de apropiación (el desvío estándar del año de aparición de la demarcación, donde un desvío menor indica una mayor velocidad); 2) período pico de actividad de apropiación (la moda del año de aparición de la demarcación); y 3) última actividad (el año de detección más reciente dentro de una celda de grilla). Esto reveló que una gran proporción (43%) de la región boscosa remanente estaba experimentando una apropiación de tierras activa (con la última aparición de demarcaciones registrada entre 2016 y 2020), y que se produjeron picos de actividad de apropiación entre 2015 y 2020 en el noreste de Argentina, el norte de Paraguay y el noroeste del Chaco boliviano (Fig. 1A).

Se utilizaron combinaciones de estas métricas para definir tres patrones de apropiación de interés: consolidación, mantenimiento y emergencia (Fig. 1C). A continuación, se empleó un análisis de agrupamiento basado en densidad para identificar "focos" de estos patrones de apropiación (SI Appendix, sección 4). Las áreas que experimentaban consolidación de la apropiación —es decir, aquellas que presentaban simultáneamente una densidad de apropiación de media a muy alta y una apropiación activa— se agrupaban mayormente en torno a los frentes de expansión agrícola. Se identificaron agrupamientos de consolidación particularmente evidentes en las áreas central y septentrional del Chaco argentino (Fig. 1C, zonas c, d y g), y en el norte del Chaco boliviano (j). Las áreas que exhibían mantenimiento de la apropiación presentaban una alta densidad de demarcaciones forestales pero sin nuevas demarcaciones desde 2016, lo que indica que, si bien las demarcaciones en estas áreas no habían sido desmontadas recientemente, aún eran visibles y, por lo tanto, probablemente se encontraban al menos parcialmente mantenidas (de lo contrario, la vegetación habría regenerado). Estas áreas se encontraban predominantemente en el Chaco argentino, con agrupamientos en el sur (Fig. 1C, e) y en el noroeste (i). Este último corresponde a una concentración de líneas de relevamiento de exploración petrolera de las décadas de 1970 y 1980, muchas de las cuales fueron adoptadas posteriormente como

¹ Usamos la palabra "apropiación" como traducción de la palabra inglesa "claim", que también se puede traducir como "reclamo".

demarcaciones de propiedad. Las áreas con emergencia de la apropiación —es decir, con baja densidad de demarcaciones pero aparición rápida de nuevas demarcaciones— estaban más dispersas en comparación con los dos patrones anteriores, con agrupamientos difusos en el Chaco Húmedo de Paraguay y Argentina, y a lo largo de la frontera entre Bolivia y Paraguay.

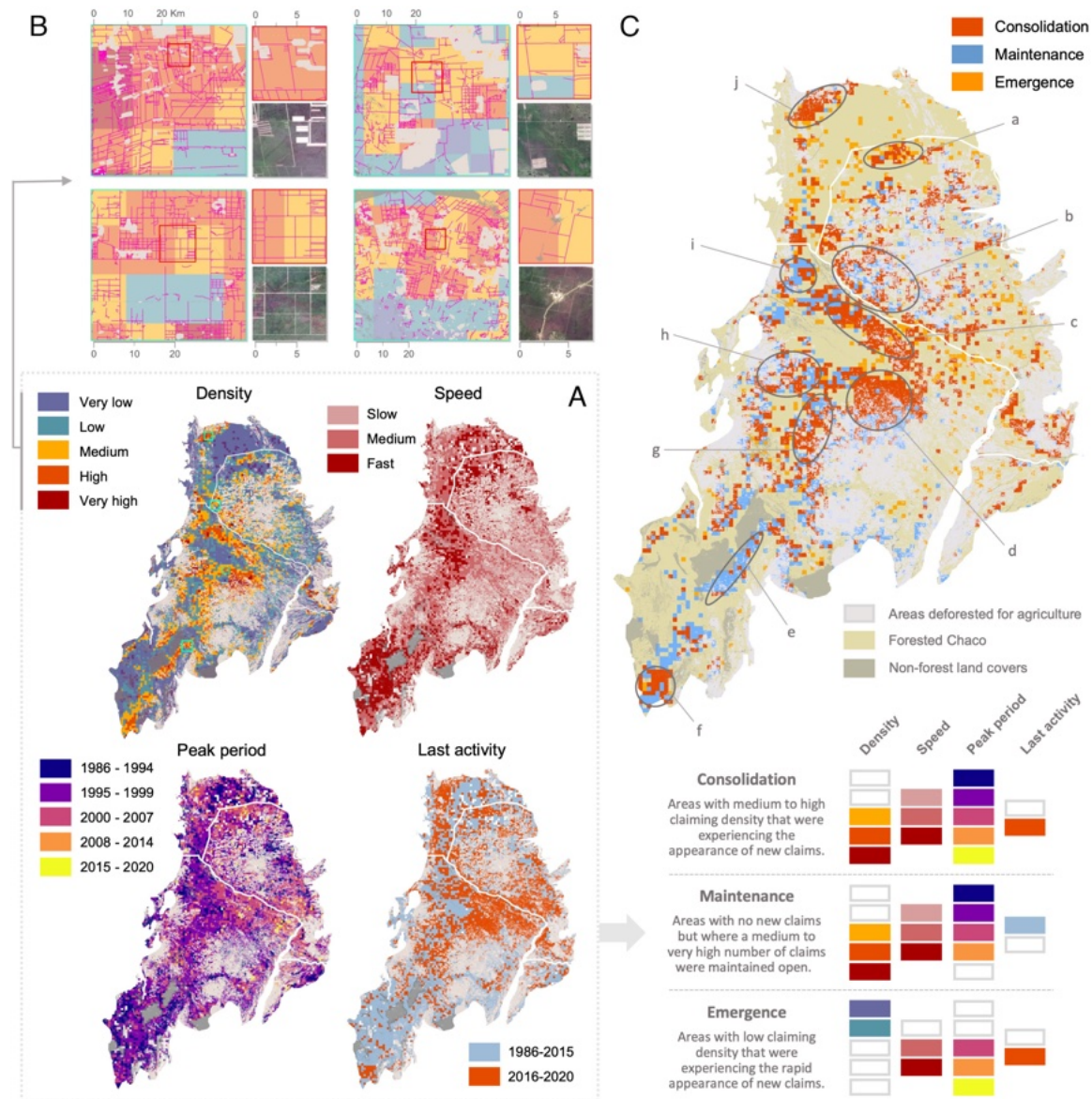


Fig. 1. Dinámica de apropiación de tierras en el Gran Chaco. Los mapas en el panel (A) representan las cuatro métricas de apropiación en toda la región. El panel (B) muestra la disposición de las demarcaciones forestales (en magenta) sobre la métrica de densidad mapeada en (en sentido horario desde la esquina superior izquierda) el Chaco boliviano septentrional, el Chaco paraguayo occidental y el Chaco argentino central y meridional. Los recuadros en rojo dentro de estos se utilizan para ilustrar cómo las demarcaciones forestales extraídas se proyectan sobre las imágenes satelitales. El mapa más grande a la derecha (C) muestra la distribución de la consolidación de la apropiación (rojo), el mantenimiento de la apropiación (azul) y la emergencia de la apropiación (naranja) en todo el Chaco. Las combinaciones específicas de clases de métricas utilizadas para clasificar las áreas en esos tres tipos de

patrones de apropiación se detallan debajo del mapa. Los recuadros con letras (a-j) señalan agrupaciones de patrones.

1.3. Comparación de la Apropiación de Tierras con Indicadores de Frontera Basados en la Deforestación

Se utilizó el indicador de "actividad" de la frontera de deforestación elaborado por Baumann et al. (25) para evaluar la relación espacial entre la apropiación de tierras y la deforestación destinada a tierras de cultivo y pasturas en el Chaco. Al examinar la distribución de la apropiación de tierras en relación con los frentes de deforestación activos (es decir, áreas con una alta tasa de pérdida de bosques secos entre 2016 y 2020, en relación con el período 1985-2015), se encontró una superposición sustancial entre estos últimos y las áreas de apropiación alta a muy alta (Fig. 2). Estas fronteras de deforestación activa también intersectaban fuertemente con los agrupamientos de patrones de apropiación, en particular con la consolidación de la apropiación (SI Appendix, Fig. S24). Más allá de las áreas de superposición, la densidad de apropiación en el Chaco fue mayor en las inmediaciones de la deforestación. Paraguay presentó una disminución más pronunciada de la densidad de apropiación con la distancia respecto del frente de deforestación activa, probablemente debido a la escasa superficie de bosque continuo remanente en la región. Las áreas que experimentaban una apropiación rápida, activa y reciente (período pico 2015-2020) fueron también las que se encontraron, en promedio, más próximas a los frentes de deforestación activa (véanse los gráficos en la Fig. 2 y SI Appendix, Fig. S25).

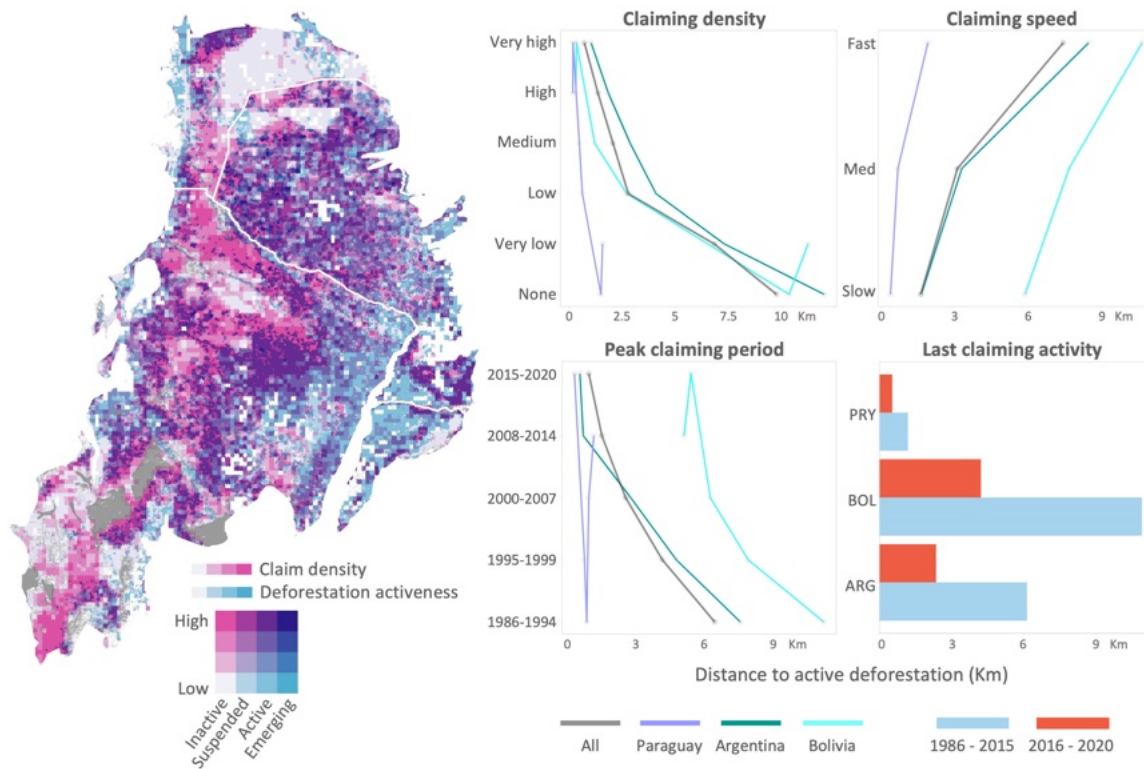


Fig. 2. Comparación espacial de la apropiación de tierras y la deforestación para la producción agrícola de *commodities* en el Chaco. Los puntos en los gráficos representan el valor medio de clase por país.

1.4. Aproximación al Impacto Social de la Apropiación de Tierras

Para aproximar el impacto potencial de la actividad de apropiación en el Chaco, se utilizó un conjunto de datos de puntos que representan puestos dispersos de pequeños productores forestales ($n = 23.954$) en el Chaco, el cual contiene información sobre su dinámica temporal (aparición, persistencia o desaparición entre 1985 y 2018) (43). Para examinar la relación entre esta dinámica temporal y la apropiación de tierras a nivel de punto, se atribuyó a cada puesto los valores medios de las métricas de apropiación en un buffer circular de 10 km a su alrededor. Posteriormente se calcularon: 1) la proporción de puestos dentro de cada celda de grilla que estaban presentes en 1985 pero que habían desaparecido para 2018; 2) la proporción de puestos que habían persistido de manera continua entre 1985 y 2018; y 3) el valor medio de las métricas de apropiación dentro de celdas de grilla de 275 km² (es decir, de agregación). Esto permitió examinar la relación entre la apropiación de tierras y la desaparición/persistencia de puestos en el Chaco (Fig. 3 y SI Appendix, Figs. S27–S30).

Si bien no se caracterizaron directamente las demarcaciones de tierras en función de los actores que las realizan, las marcadas disparidades en materia de capacidades financieras, sociales y tecnológicas entre los actores agroindustriales y los pequeños productores de la región (44–46) hacen muy probable que los primeros sean responsables de la gran mayoría de estas demarcaciones. Una demarcación externa puede representar una variedad de situaciones para una familia o comunidad de pequeños productores, ya que los inversores que reclaman un lote de tierra pueden hacerlo con o sin medidas coercitivas destinadas a excluir a las personas de la ocupación o el uso de dicha tierra (47, 48). Por ejemplo, en los casos en que las familias ocupan tierras reclamadas por inversores externos décadas antes, pueden permanecer temporalmente sin ser perturbadas a pesar del mantenimiento de dichas demarcaciones, o bien pueden tener acuerdos verbales o contractuales (como el pago de arrendamiento al demarcante) para el uso de esa tierra. Sin embargo, cuando esos actores externos consideran que la exclusión responde a sus intereses, tanto las demarcaciones antiguas como las nuevas se convierten en límites rígidos, cuya transgresión puede derivar en situaciones de violencia (31). Las demarcaciones realizadas por los propios pequeños productores —frecuentemente como estrategia ante el incremento de las presiones sobre el acceso a la tierra— también desempeñan un papel importante en la reconfiguración del control territorial (49). En particular, cuando las familias realizan demarcaciones de manera individual (en lugar de colectiva) para el uso privado, la presión hacia la privatización puede generar un ciclo autorreforzado de pérdida internalizada de acceso. La pérdida de acceso comunal o de acceso abierto a los recursos se presenta entonces como un desafío mayor para la continuidad de los medios de subsistencia de los pequeños productores, en especial en lo que respecta a las actividades de ganadería y aprovechamiento forestal (50).

El impacto de estas presiones externas e internas se reflejó en los resultados a través de la considerable superposición encontrada entre las áreas de alta densidad de apropiación y aquellas con una elevada proporción de desaparición de puestos (hexágonos negros en la Fig. 3). Cabe destacar que las áreas con una alta proporción de desaparición de puestos se concentraron en y alrededor de los "focos" de mantenimiento, consolidación y emergencia de la apropiación (Fig. 3, a-f). A la inversa, se encontró superposición entre las áreas de baja densidad de apropiación y aquellas con menores niveles de desaparición de puestos (hexágonos grises en la Fig. 3). Al mapear la persistencia de los puestos, estas áreas de superposición con baja densidad de apropiación se acentuaron aún más (SI Appendix, Fig. S28). Una exploración preliminar de la probabilidad de desaparición y persistencia en relación con la densidad de apropiación mediante regresiones logísticas simples respaldó estas evaluaciones visuales: a medida que la apropiación aumenta en un área determinada, la probabilidad de desaparición de los puestos se

incrementa mientras que, simultáneamente, la probabilidad de persistencia disminuye (Fig. 3 y SI Appendix, Fig. S30 y Table S11).

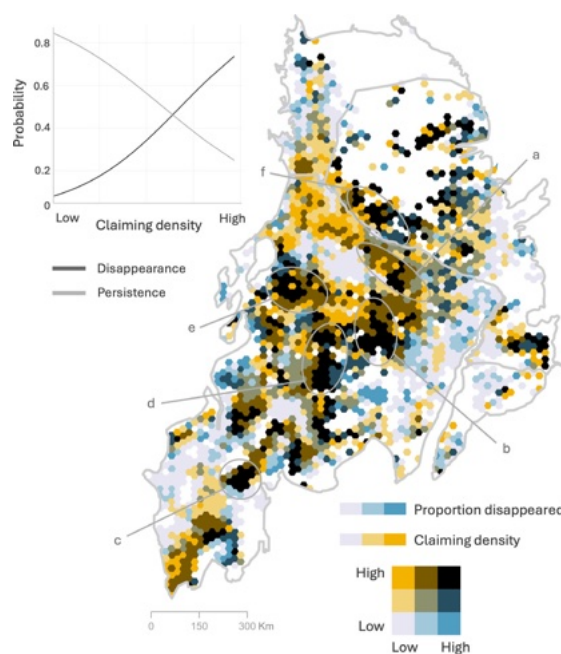


Fig. 3. Exploración de la relación entre la apropiación de tierras y la dinámica de los puestos de pequeños productores. El mapa relaciona la densidad media de apropiación con la proporción de puestos de pequeños productores desaparecidos hacia 2018 dentro de cada celda de grilla hexagonal. Los hexágonos que no contenían puestos entre 1985 y 2018 no están representados en el mapa. Las letras indican áreas (marcadas con círculos) de alta desaparición de puestos que coincidieron con focos de mantenimiento, consolidación y/o emergencia de la apropiación. El recuadro con el gráfico muestra la probabilidad de desaparición de puestos (línea de tendencia oscura) y de persistencia (línea de tendencia clara) en función del grado de intensidad de apropiación experimentado dentro de un radio de 10 km de los puestos. Detalles adicionales en SI Appendix, sección 6.

1.5. Limitaciones del Enfoque

El enfoque adoptado para capturar la dinámica temprana de las fronteras de *commodities* agrícolas en el Chaco presenta ciertas limitaciones. En primer lugar, se detectaron las demarcaciones de tierras visibles en 2020, por lo que no se capturó la apropiación de tierras en áreas que fueron desmontadas para uso agrícola antes de ese año. El enfoque no permite, por lo tanto, una reconstrucción completa de los patrones de apropiación de tierras en el paisaje. En segundo lugar, dada la posibilidad de que algunas demarcaciones hayan sido abandonadas y hayan desaparecido para 2020 debido a la regeneración de la vegetación, es posible que se subestime la intensidad pasada de la apropiación en ciertas áreas. Sin embargo, la evidencia anecdótica y la experiencia en terreno sugieren que el abandono de demarcaciones es un evento muy infrecuente, por lo que el sesgo generado por tales omisiones debería ser mínimo. En tercer lugar, es importante señalar que una desviación mayor respecto del año de referencia de detección durante los períodos 2000-2007 y 2008-2014 probablemente sesgó las métricas temporales hacia valores más bajos. En otras palabras, las métricas de dinámica de apropiación probablemente subestiman la recencia general de la actividad de apropiación (SI Appendix, sección 3). En cuarto lugar, dado que las

rutas de extracción maderera en el Chaco tienden a ser sinuosas y ramificadas, se pudo excluir la gran mayoría de estas mediante el uso de un filtro de Líneas de Hough durante la detección de elementos. No obstante, una pequeña proporción de las demarcaciones detectadas podría corresponder a rutas madereras rectas y de gran extensión (que, al no estar relevadas, no figurarían en las bases de datos de rutas utilizadas para el enmascaramiento). Esto no debería afectar sustancialmente los resultados, ya que las rutas madereras largas y rectas son poco frecuentes en el Chaco y, en general, se desarrollan a lo largo de límites de propiedades y se superponen con rutas municipales. A su vez, algunas demarcaciones podrían corresponder a líneas de transmisión de energía. En el Chaco, estas tienden a seguir el trazado de rutas relevadas, por lo que la mayoría habrá sido efectivamente enmascarada. La evaluación visual del desempeño del enfoque en la exclusión de rutas madereras y líneas de transmisión de energía se presenta en SI Appendix, Figs. S12 y S13, respectivamente. Por último, si bien el enfoque detecta de manera confiable las demarcaciones de mayor tamaño desmontadas con maquinaria por actores agroindustriales (es decir, de 10 a 20 m de ancho, conocidas localmente como "picadas"), resultó menos confiable en la detección de demarcaciones de menor tamaño (de 3 a 5 m) realizadas manualmente por pequeños productores ("deslindes"). El conjunto de datos de apropiación producido, y los resultados obtenidos a partir de su análisis, deben por lo tanto interpretarse como una representación de la dinámica de apropiación de tierras a escala regional.

2. Discusión

2.1. Los bosques que rodean las tierras de cultivo y las pasturas están fuertemente fragmentados por la apropiación de tierras

Encontramos que la actividad de apropiación de tierras en el Chaco se concentró en los frentes de desmonte y en sus alrededores. En las porciones argentina, paraguaya y boliviana de la región, los focos de actividad de apropiación de tierras coincidieron con las áreas que experimentaban una expansión activa de tierras de cultivo y pasturas, y se extendieron inmediatamente más allá de ellas. Esto pone de manifiesto cómo el proceso de asegurar el control sobre la tierra desempeña un papel instrumental en la impulsión de la expansión agrícola, al sentar las bases para el avance contiguo de las fronteras de desmonte observado en la región. La identificación de estos focos de apropiación sirve para señalar posibles trayectorias en el proceso "contagioso" de expansión de la frontera agrícola (62). Por ejemplo, los conglomerados de consolidación de la apropiación de tierras en el norte del Chaco argentino indican una probable expansión hacia el este desde el núcleo agrícola de la provincia de Salta; una expansión hacia el norte y el oeste desde el núcleo de la provincia del Chaco; y una captura de la mayor parte de los terrenos forestales restantes en la parte occidental de la provincia de Formosa. En Bolivia, la consolidación sugiere una expansión adicional de la frontera hacia el sur y el este desde el principal triángulo agrícola de las Tierras Bajas del Este. En Paraguay, donde gran parte del Chaco ya ha sido convertido, los conglomerados de consolidación a lo largo de la frontera con Bolivia apuntan a una probable expansión de la ganadería hacia estas últimas áreas remanentes de bosque no convertido.

2.2. Las fronteras agrícolas se extienden mucho más allá de los frentes de desmonte

Nuestros resultados revelan que la actividad de apropiación de tierras no se limita a las áreas inmediatamente circundantes al desmonte activo para uso agrícola. Por el contrario, las apropiaciones fragmentan áreas forestadas que, considerando únicamente los indicadores de cambio en el uso del suelo, serían clasificadas como en gran medida "intactas" por la actividad agrícola, lo que indica que la actividad de frontera incipiente está ocurriendo en la mayor parte del Chaco. En la porción argentina de la región, muchas de estas apropiaciones más remotas se realizaron durante el inicio y el despegue del auge de los *commodities* en la región (1995–2007) y se mantuvieron abiertas hasta 2020. Este estado suspendido de apropiación de tierras en gran parte del Chaco argentino es sumamente preocupante, ya que insinúa un juego de espera por parte de los inversores en tierras. Con el desmantelamiento de las protecciones ambientales y sociales propuesto por el gobierno de Milei desde 2023, la amenaza de reactivación de las fronteras en estas áreas es elevada (63, 64).

Más allá de la presencia generalizada de apropiaciones más antiguas mantenidas a lo largo del tiempo, también observamos la aparición rápida de nuevas apropiaciones de tierras entre 2016 y 2020 en gran parte del centro y nordeste del Chaco argentino, a pesar de que parte de ese territorio está protegido por la ley de bosques en Argentina (65). De manera similar, la actividad de apropiación emergente alrededor de la triple frontera y a lo largo de la frontera norte entre Bolivia y Paraguay indica un interés relativamente reciente y creciente en la tierra en ambos países, una tendencia acorde con la agenda política y económica extractivista observada en ambos países en la última década (66, 67).

Sin embargo, no todo el Chaco ha sido visiblemente apropiado. Nuestro análisis también permitió identificar áreas que no exhibían actividad de apropiación de tierras en 2020. Estas se concentraron en regiones con menor aptitud agrícola (principalmente zonas áridas y suelos salinos o escarpados) y, de manera significativa, en áreas protegidas, cuyos límites —como los de los parques nacionales Copo en Argentina, Kaa-Iya en Bolivia y Médanos del Chaco en Paraguay— coinciden con una caída abrupta en la actividad de apropiación de tierras en comparación con las zonas no protegidas circundantes. Este hallazgo subraya la importancia de contar con protecciones reforzadas y mecanismos de control efectivos para salvaguardar los bosques y las poblaciones que habitan en ellos, particularmente a medida que las fronteras agrícolas se aproximan a estas áreas otrora remotas (68–70).

2.3. La desaparición de los puestos de pequeños productores coincide con las presiones de apropiación de tierras

La expansión continua de la agricultura de *commodities* hacia los bosques tropicales y subtropicales representa una amenaza directa para los medios de subsistencia de millones de personas que dependen del bosque a nivel mundial (43). Nuestro estudio demuestra que esta amenaza no se limita a las áreas que están experimentando activamente el desmonte. Más allá del frente de desmonte, familias y comunidades están experimentando las consecuencias de una carrera por asegurar el control sobre tierras prospectadas para la producción de *commodities* (71, 72). Este acaparamiento del control (73) comienza con frecuencia mediante apropiaciones de tierras realizadas a través del registro legal —aunque no necesariamente por medios legales— y "pruebas" físicas de mérito para la titularidad: un proceso que culmina mucho antes de que una parcela sea convertida a uso agrícola, con la imposición de derechos de acceso privado (73, 74).

La presencia de bosque, por lo tanto, no equivale necesariamente a su accesibilidad para los pequeños productores que dependen de él, y puede enmascarar procesos en curso de exclusión.

Al exponer la expansión de la apropiación de tierras en el Chaco, nuestro análisis evidencia las intensas presiones sobre la tierra que enfrentan los pequeños productores que habitan en zonas forestales de la región. La correlación espacial entre la desaparición de los puestos de pequeños productores y la actividad de apropiación de tierras subraya aún más la gravedad de la situación. En efecto, encontramos que donde la actividad de apropiación de tierras era más elevada, también lo era la desaparición de puestos, no solo en áreas que experimentaban desmonte activo, sino también en áreas forestadas más remotas. Aunque estos resultados ofrecen únicamente una visión aproximada y preliminar de los impactos sociales de la apropiación de tierras en la región, lo que señalan es que la delimitación de tierras no indica únicamente una amenaza futura para el acceso de los pequeños productores —que se materializaría en el momento del desmonte—, sino también, en muchos casos, un cambio inmediato en las normas de acceso a la tierra y los recursos, con consecuencias directas sobre los medios de subsistencia locales.

2.4. Una necesidad urgente de monitoreo de las fronteras agrícolas

Al situar en el mapa las dinámicas tempranas de la apropiación de tierras para la expansión agrícola, nuestros hallazgos revelan un panorama más completo de las fronteras de *commodities* emergentes: una "huella" más verdadera que trasciende las conversiones de uso del suelo que ocurren en una etapa posterior para abarcar los cambios en el control de la tierra que les dan origen. Esto complementa otros esfuerzos en curso orientados a caracterizar procesos clave pero poco visibles del desarrollo temprano de la frontera agrícola, como la aparición de caminos fantasma (75). La omnipresencia de la actividad de apropiación de tierras en torno a los frentes activos de desmonte en el Chaco —pero también mucho más allá de ellos— refleja probablemente procesos similares en otras regiones de bosques secos que están experimentando la expansión de fronteras agrícolas. El monitoreo de la apropiación de tierras con foco en los bosques es, por lo tanto, esencial. Sin él, continuaremos sin detectar los cambios en las dinámicas de acceso a los recursos que, en última instancia, sientan las bases para la destrucción de los bosques y el deterioro de las condiciones de vida de las personas que dependen de ellos. Nuestro enfoque ofrece un modelo para el mapeo de indicadores de control de la tierra en grandes extensiones geográficas, complementando asimismo las iniciativas de mapeo de tenencia de la tierra (76–78). El énfasis en la morfología de la imagen, más que en las señales espectrales, hace que nuestro método sea adaptable a elementos de distintas formas y a imágenes de entrada de mayor o menor resolución. Es, por lo tanto, transferible a distintos contextos globales en los que el indicador específico de cambio en el control de la tierra necesariamente diferirá. Adicionalmente, para el Chaco, el enfoque proporciona una manera rápida y confiable de continuar monitoreando la apropiación de tierras en la región en el futuro.

La capacidad de monitorear las dinámicas de expansión temprana de las fronteras abre la posibilidad de identificar áreas en riesgo de sufrir deforestación y, en consecuencia, de fortalecer las presiones en favor de la responsabilidad gubernamental y corporativa. Nuestro enfoque puede, por lo tanto, servir como una herramienta de incidencia para prevenir o mitigar los daños sociales y ecológicos asociados a la expansión agrícola temprana en áreas donde las asimetrías de poder suelen ser pronunciadas y la aplicación de regulaciones para proteger a los sectores vulnerables y al medio ambiente es escasa. Este cambio en la manera de comprender y monitorear la expansión agrícola —una ampliación del campo de visión que revela de repente un panorama más amplio y completo— abre posibilidades para la protección de los bosques tropicales y subtropicales y de las personas que dependen de ellos.

3. Materiales y Métodos

3.1. Mapeo de la Aparición de Demarcaciones en el Chaco

Para mapear las demarcaciones en el Chaco, utilizamos imágenes de reflectancia superficial ortorrectificadas y corregidas atmosféricamente Sentinel-2 Nivel-2A correspondientes a la estación seca de 2020 (79). En primer lugar, enmascaramos todas las nubes y sombras de nubes y calculamos un conjunto de métricas espectrales-temporales (25, 80) a una resolución espacial de 10 m. Eliminamos los valores atípicos (altos y bajos) de las imágenes para aumentar el contraste general de los elementos lineales dentro de la imagen. En segundo lugar, aplicamos varias operaciones de morfología de imagen para generar un conjunto inicial de demarcaciones candidatas. Para comenzar, aplicamos un filtro Sato para mapear las probabilidades de tubularidad (es decir, la probabilidad de formar parte de un elemento de imagen largo y hueco) (81), y luego aislamos las áreas de alta probabilidad, lo que nos permitió obtener una imagen binaria simplificada de elementos paisajísticos tubulares (salida a). Posteriormente, con el fin de aislar los elementos rectos y largos de alta confiabilidad dentro de este espacio binario, aplicamos una transformación de línea Hough (82). Al especificar parámetros restrictivos para esta transformación, obtuvimos una salida (b) con baja completitud pero que contenía un conjunto de elementos lineales de alta confianza. En tercer lugar, utilizamos estos elementos de alta confianza para entrenar un clasificador Random Forest (RF) (83) con el fin de identificar todos los demás elementos lineales en nuestra área de estudio, eliminando al mismo tiempo las lagunas presentes en los pasos anteriores. Para dar cuenta de las variaciones específicas según la cobertura del suelo (por ejemplo, bosques degradados frente a bosques no perturbados) en el Chaco que afectan la reflectancia, parametrizamos clasificadores individuales para regiones de 10×10 km. En cuarto lugar, utilizamos operaciones de morfología de imagen para eliminar del resultado del modelo RF las líneas pequeñas que, tras inspecciones visuales, parecían ser clasificaciones erróneas (SI Appendix, Fig. S2).

Con el fin de aislar las demarcaciones forestales entre la totalidad de los elementos lineales detectados en el Chaco, utilizamos conjuntos de datos geoespaciales existentes (84–88) para enmascarar los elementos que se superponían con rutas y autopistas, áreas urbanas, tierras de cultivo y pasturas, y cuerpos de agua (es decir, ríos, lagos, embalses, humedales y salinas). Para identificar luego el año de aparición de cada demarcación forestal, empleamos la segmentación temporal LandTrendr (89) utilizando composites medianas anuales de imágenes Landsat. Aplicamos LandTrendr a cada segmento mapeado y derivamos el «año de mayor perturbación» como indicador del año de creación de la demarcación (entre 1986 y 2020). Se presentan ejemplos de resultados en distintas regiones en SI Appendix, Figs. S5 y S6.

3.2. Validación del Método

Validamos nuestro conjunto de datos de demarcaciones forestales de dos maneras. En primer lugar, validamos el mapa contemporáneo de demarcaciones forestales (es decir, si una demarcación fue identificada correctamente o no para el año 2020) utilizando el protocolo de análisis de correspondencia lineal desarrollado por Wiedmann (90), que ha sido aplicado para validar la extracción de elementos lineales —en particular, datos de rutas— en diversos estudios (91–93). En síntesis, el protocolo consiste en comparar (es decir, «hacer coincidir») los elementos extraídos automáticamente con segmentos de referencia. Para producir los datos de referencia en el caso en cuestión, digitalizamos manualmente demarcaciones forestales dentro de 130 hexágonos de validación de 10 km^2 seleccionados aleatoriamente (para un total de $\approx 1.000 \text{ km}$ de longitud de elementos de referencia producidos para el Chaco). La precisión del método de extracción automática fue evaluada, siguiendo a Wiedmann, mediante el cálculo de dos métricas básicas de correspondencia: completitud y corrección. La completitud cuantifica la cobertura lograda por el proceso de extracción (donde una puntuación de completitud de 1 (o 100%) indica una cobertura de extracción perfecta, lo que significa que todos los elementos de referencia han sido extraídos con precisión).

Completitud = Longitud de la referencia coincidente / Longitud total de la referencia.

La corrección, por su parte, evalúa la proporción de los elementos extraídos que corresponden correctamente a los datos de referencia, ofreciendo una estimación de la precisión de la extracción [donde una puntuación de corrección de 1 (o 100%) indica que todos los elementos extraídos corresponden a los datos de referencia].

$$\text{Corrección} = \text{Longitud de la extracción coincidente} / \text{Longitud total de la extracción.}$$

Evaluamos la completitud tanto en función del total de referencias de demarcaciones coincidentes como de las referencias «ciertas» coincidentes (es decir, los segmentos de referencia sobre los cuales teníamos certeza de que eran demarcaciones), proporcionando así una evaluación de cobertura en dos niveles (SI Appendix, Figs. S7 y S8 y Table S5). Asimismo, validamos el conjunto de datos temporalmente asignando manualmente un año de aparición a los segmentos de demarcación (evaluados mediante composites anuales de imágenes Landsat) y calculando luego la desviación promedio en años asignados entre los segmentos de referencia y los extraídos (SI Appendix, Figs. S9 y S10 y Table S6). Los detalles sobre la validación temporal se encuentran en SI Appendix, sección 3.

3.3. Análisis de la Distribución y Dinámica de las Demarcaciones

Produjimos diversas métricas a una resolución espacial de 10 km para caracterizar la distribución y la dinámica de la apropiación de tierras (Fig. 1A y SI Appendix, Table S7). Para caracterizar la distribución de la apropiación, produjimos una métrica de densidad de apropiación, calculada como la suma de las longitudes de las demarcaciones dividida por el área total boscosa dentro de cada celda de grilla de 10 × 10 km. Esta corrección se realizó para que la métrica reflejara la densidad específicamente dentro de las áreas boscosas; sin ella, las celdas de grilla con mayor deforestación habrían figurado erróneamente como de menor densidad. Luego clasificamos los valores de densidad utilizando el algoritmo de clasificación Natural Breaks (Jenks) (SI Appendix, Fig. S14). Para caracterizar la dinámica de la apropiación, evaluamos el período de mayor apropiación, la velocidad de apropiación y la actividad de apropiación más reciente (última actividad). Para el período de mayor actividad, clasificamos en primer lugar los segmentos de demarcación en períodos correspondientes a las etapas de expansión de la agricultura a gran escala en la región: 1986-1994 corresponde al período previo al despegue de las fronteras agrícolas en el área; 1995-1999, a la entrada de la soja genéticamente modificada en la región; 2000-2007, a la fiebre de tierras posterior a la crisis económica argentina; 2008-2014, al pico de expansión de la frontera de *commodities*; y finalmente, 2015-2020 corresponde a las condiciones más recientes (25, 94–96). Luego asignamos a cada celda de grilla el período mayoritario, por conteo de segmentos, de aparición de demarcaciones. La velocidad de la actividad de apropiación se definió en términos del desvío estándar del año de aparición de las demarcaciones, donde un mayor desvío estándar implica una apropiación más lenta, ya que indica que distintos segmentos aparecieron en años más alejados entre sí respecto del promedio (SI Appendix, Fig. S15). La última actividad de apropiación se calculó como el año más reciente de actividad de apropiación detectada dentro de una celda de grilla, clasificándose luego como 1986-2015 (es decir, inactiva) o 2016-2020 (es decir, activa). Los resúmenes de métricas por regiones de frontera y por provincia se encuentran en SI Appendix, Figs. S16 y S17 y Tables S8 y S9.

Con el fin de destacar las dinámicas de apropiación más relevantes en el área, utilizamos combinaciones de estas métricas para clasificar un subconjunto de las celdas de grilla de 10 × 10 km en tres patrones de apropiación distintos: 1) consolidación, 2) mantenimiento y 3) emergencia. Se clasificaron como en proceso de «consolidación» las celdas que simultáneamente presentaban densidad de apropiación media a muy alta, actividad máxima entre 1986 y 2020, y apropiación activa; es decir, aquellas en las que se estaban añadiendo nuevas apropiaciones a una densidad ya elevada de apropiaciones existentes. Las celdas en «mantenimiento» presentaban densidad de apropiación alta a muy alta, actividad máxima entre 1986 y 2014, y apropiación inactiva; es decir, no se registraban nuevas apropiaciones, pero se mantenía una alta densidad de apropiaciones más antiguas hasta 2020. La «emergencia» correspondía a una densidad de apropiación muy baja a baja, actividad máxima entre 2000 y 2020, apropiación activa y velocidad de apropiación media a rápida; es decir, áreas en las que se estaban acumulando nuevas apropiaciones de manera relativamente rápida en zonas con escasas o nulas apropiaciones previas (SI Appendix, Table S10). Para identificar focos de cada patrón a efectos del análisis, realizamos un análisis de agrupamiento basado en densidad sobre las celdas de grilla aisladas (SI Appendix, sección 4). Los agrupamientos confiables se identificaron evaluando múltiples combinaciones de los parámetros de distancia de búsqueda y cantidad mínima de elementos por agrupamiento, para cada patrón de forma individual y para una combinación de los tres patrones (SI Appendix, Fig. S18).

3.4. Relación entre la Apropiación de Tierras y los Indicadores de la Frontera de Deforestación

Para relacionar las métricas de apropiación con la medida de actividad de la deforestación producida por Baumann et al. para la región (25), utilizamos una grilla hexagonal de 10 km², en la que a cada celda de grilla se le asignaron valores de las métricas de apropiación en su centroide. Para capturar de manera amplia el alcance de la deforestación en curso, el valor máximo que caía dentro de cada hexágono se utilizó luego para asignarle un valor de momento de frontera; es decir, activa (=2) prevalecía sobre suspendida (=1), y emergente (=3) prevalecía sobre activa. Esto resultó en un conjunto de datos unificado que contenía tanto las métricas de apropiación como los valores de actividad de la deforestación para la región. Examinamos luego la relación espacial entre la actividad de la deforestación y la apropiación de tierras calculando la distancia métrica desde cada hexágono de 10 km² hasta el hexágono más cercano clasificado como de deforestación activa para uso agrícola, explorando los patrones a escala regional y por país (Fig. 2 y SI Appendix, Figs. S24 y S25).

3.5. Examen de la Relación entre la Apropiación de Tierras y la Dinámica de los Puestos

Para examinar el potencial impacto social de la actividad de apropiación en el Chaco, utilizamos datos puntuales de puestos de pequeños productores forestales ($n = 23.954$), que contenían información sobre cuándo, entre 1985 y 2018, cada puesto era visible en las series temporales de imágenes Landsat, y por tanto, si un puesto surgió, desapareció o persistió (43). En primer lugar, extrajimos los valores medios de las métricas de apropiación dentro de un radio de 10 km desde cada puesto. Luego produjimos una grilla hexagonal amplia (275 km²) sobre la cual resumir simultáneamente tanto las condiciones de apropiación como la dinámica de los puestos de pequeños productores en términos de desaparición y persistencia. La desaparición se calculó como la proporción de puestos dentro de cada celda de grilla que estaban presentes en 1985 pero habían desaparecido para 2018. La persistencia, a su vez, se calculó como la proporción de puestos que habían sido registrados de manera continua como presentes entre 1985 y 2018. Con este conjunto de datos conjunto, exploramos luego la relación entre la apropiación de tierras y la dinámica de los puestos de pequeños productores mediante interpretación visual de coropletas bivariadas (Fig. 3 y SI Appendix, Fig. S27 para todas las comparaciones de métricas, y SI Appendix, Figs. S28 y S29 para comparaciones de tendencias de desaparición y persistencia). Utilizando los puntos de puestos, a cada uno de los cuales se le asignaron valores de métricas locales según se detalla en el primer paso, también exploramos estas relaciones mediante regresiones logísticas (SI Appendix, Fig. S30 y Table S11).

Disponibilidad de Datos, Materiales y Software

Todos los scripts de análisis de esta investigación están disponibles de forma abierta en el siguiente repositorio de GitHub: (https://github.com/odelgi/LandClaiming_analysis) (97). Los datos (es decir, los segmentos de demarcación lineal mapeados en el Gran Chaco, así como los mapas agregados de métricas de apropiación de tierras para toda la región) serán almacenados por los autores (en un repositorio institucional) y estarán disponibles ante solicitud razonada, lo que implica demostrar intención de uso para a. investigación académica adicional o b. interés por parte de organizaciones sin fines de lucro y organismos gubernamentales. Esta restricción parcial ha sido establecida con el fin de evitar que los datos sean utilizados como herramienta en análisis de aptitud agrícola.

Agradecimientos

Este trabajo contó con el apoyo del Social Sciences and Humanities Research Council, el programa Vanier Canada Graduate Scholarship (Proyecto #202111CGV-475700-93765), y el Consejo Europeo de Investigación en el marco del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea (Acuerdo de subvención N.º 101001239 SYSTEMSHIFT, <http://hu.berlin/systemshift>). Agradecemos a P. Hostert, T. de Marzo, P. Rufin, L. Lu, P. Matthews, P. Osei Darko y T. Elrick por sus aportes al enfoque metodológico y, en particular, al análisis de series temporales de teledetección, y a S. Schulz, C. Dammann, T. Elrick, R. Shi y J. Vacirca por su apoyo administrativo. Expresamos nuestro sincero agradecimiento a tres evaluadores anónimos por sus comentarios alentadores, constructivos y sumamente valiosos. Esta investigación contribuye al Global Land Program (<https://glp.earth>).

Bibliografía

1. K. Richardson et al., Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci. Adv.* 9, eadh2458 (2023).
2. J. C. Pereira, E. Viola, Catastrophic climate change and forest tipping points. *Glob. Policy* 9, 513–524 (2018).
3. IPCC, *Climate Change and Land* (Cambridge University Press, 2019).
4. United Nations, "Glasgow leaders' declaration on forests and land use" (COP26, 2021).
5. United Nations, "New York declaration on forests" (2014).
6. S. Donofrio et al., "Supply change: Tracking corporate commitments to deforestation-free supply chains" (*Forest Trends*, 2017).
7. P. Jopke, G. C. Schoneveld, *Corporate Commitments to Zero Deforestation* (CIFOR, 2018).
8. M. Weisse, E. Goldman, *Forest loss | Global forest review*, WRI (2024).
9. C. Vancutsem et al., Long-term monitoring of forest cover changes in the humid tropics. *Sci. Adv.* 7, eabe1603 (2021).
10. N. Hosonuma et al., An assessment of deforestation and forest degradation drivers. *Environ. Res. Lett.* 7, 044009 (2012).
11. P. H. S. Brancalion et al., Emerging threats linking tropical deforestation and COVID-19. *Perspect. Ecol. Conserv.* 18, 243–246 (2020).
12. H. M. Jayathilake et al., Drivers of deforestation and degradation for 28 tropical conservation landscapes. *Ambio* 50, 215–228 (2021).
13. X. Hu et al., Recent global land cover dynamics and implications for soil erosion. *Anthropocene* 34, 100291 (2021).
14. H. K. Gibbs et al., Tropical forests were the primary sources of new agricultural land. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 107, 16732–16737 (2010).
15. E. Goldman et al., Estimating the role of seven commodities in agriculture-linked deforestation, WRIPUB (2020).
16. J. M. Balogh, A. Jámbor, The environmental impacts of agricultural trade. *Sustainability* 12, 1152 (2020).
17. N. T. Hoang, K. Kanemoto, Mapping the deforestation footprint of nations. *Nat. Ecol. Evol.* 5, 845–853 (2021).
18. C. Hong et al., Land-use emissions embodied in international trade. *Science* 376, 597–603 (2022).
19. M. G. Ceddia, The impact of income, land, and wealth inequality on agricultural expansion in Latin America. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116, 2527–2532 (2019).
20. D. Calmon, Shifting frontiers: The making of Matopiba in Brazil. *J. Peasant Stud.* 49, 263–287 (2022).
21. G. d. L. T. Oliveira et al., Beyond land grabs: New insights on land struggles. *Globalizations* 18, 321–338 (2021).
22. W. W. Wolford et al., Global land deals: What has been done, what has changed, and what's next? *J. Peasant Stud.* 0, 1–38 (2024).
23. J. W. Seaquist et al., Architecture of the global land acquisition system. *Environ. Res. Lett.* 9, 114006 (2014).
24. Y. le Polain et al., Rents, actors, and the expansion of commodity frontiers in the Gran Chaco. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 108, 204–225 (2018).
25. M. Baumann et al., Frontier metrics for a process-based understanding of deforestation dynamics. *Environ. Res. Lett.* 17, 095010 (2022).
26. A. Buchadas et al., Uncovering major types of deforestation frontiers across tropical dry woodlands. *Nat. Sustain.* 5, 619–627 (2022).
27. S. Beckert et al., Commodity frontiers and the transformation of the global countryside. *J. Glob. Hist.* 16, 435–450 (2021).
28. M. B. Rasmussen, C. Lund, Reconfiguring frontier spaces. *World Dev.* 101, 388–399 (2018).
29. N. U. de la Sancha et al., The disappearing Dry Chaco. *Landscape Ecol.* 36, 2997–3012 (2021).
30. X.-P. Song et al., Massive soybean expansion in South America since 2000. *Nat. Sustain.* 4, 1–9 (2021).
31. D. M. Cáceres, Accumulation by dispossession and socio-environmental conflicts in Argentina. *J. Agrar. Change* 15, 116–147 (2015).
32. O. del Giorgio et al., Fenced off: Measuring growing restrictions on resource access in the Argentine Chaco. *Appl. Geogr.* 134, 102530 (2021).
33. S. Marinaro et al., Private-land control and deforestation dynamics in the Northern Argentinian Dry Chaco. *Environ. Conserv.* 47, 1–7 (2020).
34. Biblioteca y Archivo Central del Congreso Nacional, Paraguay, *Ley No 1863—Estatuto Agrario* (2015).
35. Ministerio de Economía, Programa Nacional de Titulación y Arraigo Rural. *Resolución 449/13* (2013).
36. M. Urioste Fernández de Córdova, "El nuevo ciclo revolucionario" in *Concentración y extranjerización de la tierra en Bolivia* (Fundación Tierra, 2011).
37. R. Paz, C. Jara, Danzando en el tiempo: Transformaciones agrarias y persistencia del campesinado en Argentina. *Eur. Rev. Lat. Am. Caribb. Stud.* 110, 21–38 (2020).
38. M. Camino et al., Indigenous lands with secure land-tenure can reduce forest-loss. *Glob. Environ. Change* 81, 102678 (2023).

39. J. Graesser, N. Ramankutty, Detection of cropland field parcels from Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 201, 165–180 (2017).
40. F. Waldner et al., Detect, consolidate, delineate: Scalable mapping of field boundaries. *Remote Sens.* 13, 2197 (2021).
41. L. J. Quackenbush, A review of techniques for extracting linear features from imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 70, 1383–1392 (2004).
42. R. E. Kennedy et al., LandTrendr—Temporal segmentation algorithms. *Remote Sens. Environ.* 114, 2897–2910 (2010).
43. C. Levers et al., Agricultural expansion and the ecological marginalization of forest-dependent people. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, 1–9 (2021).
44. B. McKay, G. Colque, Bolivia's soy complex. *J. Peasant Stud.* 43, 583–610 (2016).
45. J. E. Correia, Soy states: Resource politics in Paraguay. *J. Peasant Stud.* 46, 316–336 (2019).
46. A. Leguizamón, Environmental injustice in Argentina. *J. Agrar. Change* 16, 684–692 (2016).
47. P. N. Barbeta, "En los bordes de lo jurídico" (Universidad de Buenos Aires, 2009).
48. A. I. Rivas, J. J. Natera, La Distribucion de la Tierra en el Norte Grande Argentino. *Baetica* 31, 91–113 (2009).
49. Z. W. Brent, Territorial restructuring and resistance in Argentina. *J. Peasant Stud.* 42, 671–694 (2015).
50. O. del Giorgio et al., Impacts of agricultural commodity frontier expansion on smallholder livelihoods. *J. Rural Stud.* 93, 67–80 (2022).
51. B. M. Campbell et al., Agriculture production as a major driver exceeding planetary boundaries. *Ecol. Soc.* 22, 1–12 (2017).
52. P. Newton et al., The number and spatial distribution of forest-proximate people globally. *One Earth* 3, 363–370 (2020).
53. L. Cotula et al., Land Grab or Development Opportunity? (IIED/FAO/IFAD, 2009).
54. W. Anseeuw et al., Creating a public tool to assess transparency in global land deals. *J. Peasant Stud.* 40, 521–530 (2013).
55. O. del Giorgio, A framework for understanding land control transfer. *J. Agrar. Change* 24, 1–23 (2023).
56. B. White et al., The new enclosures: Critical perspectives on corporate land deals. *J. Peasant Stud.* 39, 619–647 (2012).
57. C. Dummett, A. Blundell, "Illicit harvest, complicit goods" (*Forest Trends*, 2021).
58. M. Burke et al., Using satellite imagery to understand sustainable development. *Science* 371, eabe8628 (2021).
59. H. Tamiminia et al., Google Earth Engine for geo-big data applications. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 164, 152–170 (2020).
60. S. Lang et al., Earth observation tools for humanitarian assistance. *Eur. J. Remote Sens.* 53, 67–85 (2020).
61. R. Avtar et al., Remote sensing for international peace and security. *Remote Sens.* 13, 439 (2021).
62. J. N. Volante et al., Agricultural expansion in the Semiarid Chaco. *Land Use Policy* 55, 154–165 (2016).
63. CELS, "Sobre el proyecto de 'ley ómnibus'" (2024).
64. Greenpeace, Greenpeace alerta sobre el desastre ambiental que ocasionaría la Ley Ómnibus (2023).
65. S. Aguiar et al., ¿Cuál es la situación de la Ley de Bosques en la Región Chaqueña? *Ecol. Austral.* 28, 400–417 (2018).
66. O. Arigho-Stiles, New futures of ecological struggle in Bolivia. *NACLA Rep. Americas* 53, 288–295 (2021).
67. M. Baraibar Norberg, *The Political Economy of Agrarian Change in Latin America* (Springer, 2020).
68. J. Nori et al., Protected areas and spatial conservation priorities in the Gran Chaco. *Divers. Distrib.* 22, 1212–1219 (2016).
69. D. Tamburini et al., Priority areas for co-benefits between conservation and traditional use in the Chaco. *Biol. Conserv.* 277, 109827 (2023).
70. A. Romero-Muñoz et al., Habitat destruction and overexploitation in the Gran Chaco. *Global Change Biol.* 27, 755–767 (2021).
71. L. Carte et al., The slow displacement of smallholder farming families. *Land* 8, 89 (2019).
72. L. F. Rincón, B. M. Fernandes, Territorial dispossession in South America. *Third World Q.* 39, 2085–2102 (2018).
73. B. M. McKay, Control grabbing and value-chain agriculture. *Globalizations* 15, 74–91 (2018).
74. N. Busscher et al., Environmental justice implications of land grabbing in Argentina. *J. Environ. Plann. Manage.* 63, 500–522 (2020).
75. J. E. Engert et al., Ghost roads and the destruction of Asia-Pacific tropical forests. *Nature* 629, 370–375 (2024).
76. M. Koeva et al., Innovative remote sensing methodologies for Kenyan land tenure mapping. *Remote Sens.* 12, 273 (2020).
77. M. Løvschal, M. L. Gravesen, De-/fencing grasslands in postcolonial Kenya. *Land* 10, 786 (2021).
78. L. V. Basupi et al., Using participatory mapping in pastoral land use investigation. *Land Use Policy* 64, 363–373 (2017).
79. European Space Agency, Copernicus open access hub (2022).
80. J. Oeser et al., Habitat metrics based on multi-temporal Landsat imagery. *Remote Sens. Ecol. Conserv.* 6, 52–69 (2020).
81. Y. Sato et al., Three-dimensional multi-scale line filter for medical images. *Med. Image Anal.* 2, 143–168 (1998).
82. R. O. Duda, P. E. Hart, Use of the Hough transformation to detect lines. *Commun. ACM* 15, 11–15 (1972).
83. A. E. Maxwell et al., Implementation of machine-learning classification in remote sensing. *Int. J. Remote Sens.* 39, 2784–2817 (2018).

84. Instituto Geográfico Nacional, Capas SIG (2023).
85. IDE-IGM, Infraestructura de Datos Bolivia (2023).
86. J. R. Meijer et al., Global patterns of current and future road infrastructure. *Environ. Res. Lett.* 13, 064006 (2018).
87. M. L. Messenger et al., Estimating the volume and age of water stored in global lakes. *Nat. Commun.* 7, 13603 (2016).
88. B. Lehner, G. Grill, Global river hydrography and network routing. *Hydrol. Process.* 27, 2171–2186 (2013).
89. R. E. Kennedy et al., Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sens.* 10, 691 (2018).
90. C. Wiedemann, External evaluation of road networks. *ISPRS Arch.* 34, 1–6 (2003).
91. R. Nobrega et al., "An object-based approach to detect road features" in *Object-Based Image Analysis* (Springer, 2008), pp. 589–607.
92. F. Heinzle et al., "Automatic detection of patterns in road networks" (University of Hannover, 2007).
93. S. Hinz, A. Baumgartner, Automatic extraction of urban road networks. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 58, 83–98 (2003).
94. N. I. Gasparri, "The transformation of land-use competition in the Argentinean Dry Chaco" in *Land Use Competition* (Springer, 2016), pp. 59–73.
95. L. Goldfarb, A. Zoomers, "The drivers behind the rapid expansion of GM soya in the Chaco" in *Biofuels* (IntechOpen, 2013).
96. P. Delvenne et al., The "soy-ization" of Argentina. *Technol. Soc.* 35, 153–162 (2013).
97. O. del Giorgio, *LandClaiming_analysis*. Github (2024).