

Transferencia y difusión de la fertilización NPK en maíz: Trayectorias y redes

Technology Transfer and Diffusion of NPK Fertilization in Maize: Trajectories and Networks

Juan Salvador Jiménez-Carrasco^{1*} 

¹Universidad Autónoma Chapingo. Carr. Federal México-Texcoco Km 38.5, CP. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: jsjcarrasco@hotmail.com

Nota científica

Recibida: 14 de noviembre 2025

Aceptada: 20 de febrero 2026

RESUMEN. La fertilización con Nitrógeno, Fósforo y Potasio (NPK) impulsa el rendimiento del maíz, pero su adopción es desigual entre territorios. Se analizó la trayectoria temporal de adopción y la difusión interpersonal de la fertilización NPK en México mediante una encuesta retrospectiva a 37 078 productores de 15 estados. Se registró el año de adopción y el actor-fuente a través del cual se aprendió la innovación. Con base en la teoría de difusión de innovaciones de Rogers, los productores se clasificaron en innovadores, adoptantes tempranos, mayoría temprana, mayoría tardía y rezagados. La adopción alcanzó 52% y mostró trayectorias en “S” con asincronías estatales. Las fuentes se reconfiguraron: La familia predominó al inicio, la institucionalidad cobró mayor peso en la transición y extensionistas y proveedores lideraron en fases tardías. Los hallazgos respaldan intervenciones diferenciadas por etapa y territorio. El enfoque integra cronología, etapas y actores, y es replicable en extensión.

Palabras clave: Aprendizaje social, difusión de innovaciones, extensión agrícola, redes de innovación.

ABSTRACT. Nitrogen, Phosphorus, and Potassium (NPK) fertilization is a key determinant of maize yield, yet adoption is uneven across territories. This study analyzed the temporal adoption trajectory and the interpersonal diffusion of NPK fertilization in Mexico using a retrospective survey of 37 078 producers from 15 states. The year of adoption and the source actor from whom the innovation was learned were recorded. Based on Rogers’ diffusion of innovations theory, producers were classified into innovators, early adopters, early majority, late majority, and laggards. Adoption reached 52% and exhibited S-shaped trajectories with cross-state asynchronies. Innovation sources were reconfigured: Family predominated at the outset, institutional channels gained greater weight during the transition, and extension agents and input suppliers led in later phases. The findings support differentiated interventions by stage and territory. The approach integrates chronology, stages, and actors, and is replicable in extension.

Keywords: Social learning, diffusion of innovations, agricultural extension, innovation networks.

INTRODUCCIÓN

La fertilización con Nitrógeno, Fósforo y Potasio (NPK) es un pilar de la productividad del maíz, pero su uso ineficiente entraña costos ambientales y económicos. A escala global, existen rutas tecnológicas y de manejo capaces de reducir hasta en una quinta parte las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a los fertilizantes nitrogenados hacia 2050, combinando mejoras en producción y uso (Gao y Cabrera 2023). Estas acciones son coherentes con el enfoque de límites seguros y justos del sistema Tierra, en particular para los ciclos de nutrientes N y P, que demandan reducir pérdidas reactivas y cerrar bucles de uso (Rockström *et al.* 2023). En paralelo, la transición hacia una economía circular del fósforo subraya recuperar nutrientes desde corrientes residuales y optimizar formulaciones para sistemas y cultivos específicos (Walsh *et al.* 2023).

En contextos de agricultura de pequeña y mediana escala, la adopción de fertilización más eficiente no depende solo de la rentabilidad económica, sino también de mecanismos de transferencia (extensión, demostraciones, programas públicos, proveedores) y de canales de difusión interpersonal (familia, pares, líderes locales) (Shang *et al.* 2021). La evidencia muestra que sembrar información en nodos centrales de la red acelera la adopción y sostiene procesos de contagio complejo; esto tiene implicaciones directas para diseñar estrategias de extensión costo-efectivas (Beaman *et al.* 2021). En términos de política y sistemas, organismos internacionales recomiendan reorientar la transferencia de innovación hacia modelos participativos y digitales que conecten investigación y desarrollo con productores y territorios (FAO 2020).

A pesar de los avances en la comprensión de los procesos de adopción tecnológica, persisten vacíos analíticos en torno a la articulación entre transferencia institucional y difusión social en territorios agrícolas amplios. La mayoría de los estudios se han centrado en la adopción individual de innovaciones digitales o de manejo (Shang *et al.* 2021) o en ensayos controlados de difusión focalizada (Beaman *et al.* 2021), Sin considerar la evolución histórica y territorial de ambos mecanismos en conjunto. Investigaciones posteriores señalan que la difusión digital y el aprendizaje entre pares desempeñan un papel creciente en la expansión de innovaciones sostenibles (Ahmadi *et al.* 2025, Lasdun *et al.* 2025), mientras que otros trabajos advierten la coexistencia de múltiples barreras que limitan la adopción simultánea de varias innovaciones agrícolas (Bilal y Jaghdani 2024). En consecuencia, aún no se cuenta con evidencia empírica que integre la dinámica temporal de la fertilización NPK, la reconfiguración de los actores-fuente y las redes de propagación territorial en un solo marco analítico. El objetivo fue analizar la trayectoria temporal de adopción de la fertilización NPK en sistemas maiceros de México, así como el rol relativo de la transferencia institucional y la difusión interpersonal a partir de una encuesta retrospectiva multiterritorial, con énfasis en la identificación de los actores-fuente de innovación y en su reconfiguración a lo largo del proceso de adopción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y participantes

El estudio se enfocó en pequeños productores de maíz de 15 entidades del centro y sur de México (Figura 1), territorios donde persisten rezagos y restricciones estructurales para la actividad agropecuaria y, de manera concomitante, barreras de acceso a servicios e información técnica para la toma de decisiones productivas (INEGI 2023). La información se recopiló mediante encuestas estructuradas a beneficiarios de PROAGRO Productivo. La condición de pequeña escala se definió conforme a la estratificación operativa del programa, basada en superficie y régimen hídrico, y se acotó al estrato de autoconsumo (hasta 5 ha en temporal o hasta 0.2 ha en riego), equivalente a agricultura de pequeña escala en el marco del programa (SAGARPA 2013).

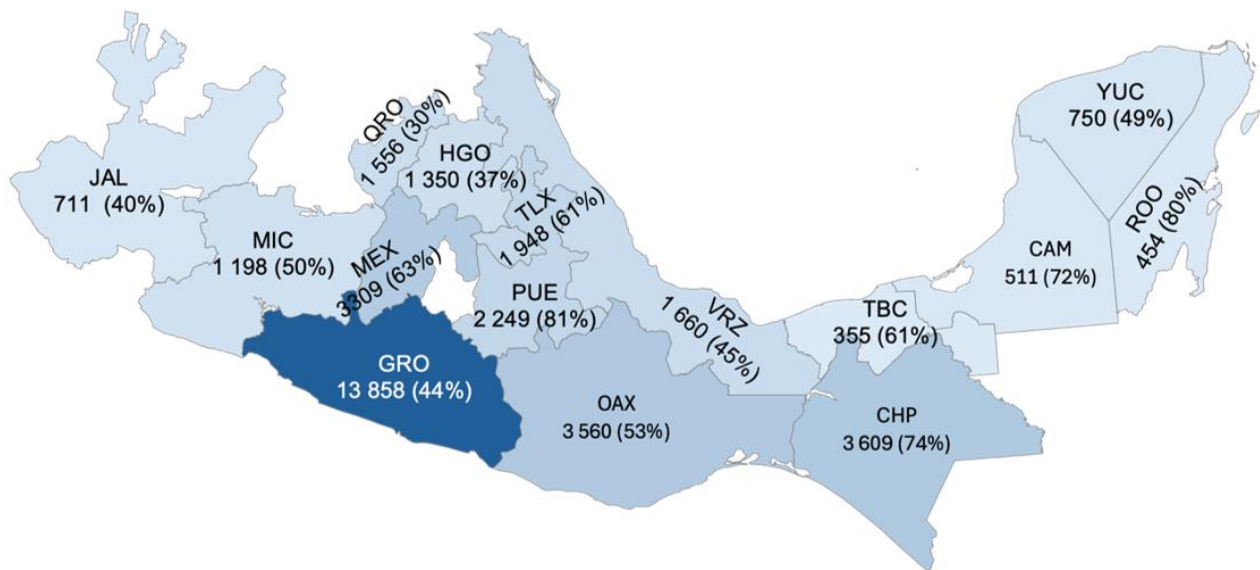


Figura 1. Productores encuestados y adopción reportada de fertilización NPK por estado. Nota: Las cifras dentro de cada estado indican el número de productores encuestados y el porcentaje de adopción de la innovación; el gradiente de color azul refleja la concentración de productores encuestados.

Recolección de datos, muestra y variables

La encuesta se estructuró en dos bloques: I) Identificación, que recabó información del productor y de la unidad de producción (p. ej., superficie, rendimiento, proporción destinada al autoconsumo, entre otros), y II) Red de innovación, que documentó el uso de un conjunto de innovaciones cuyo listado varió por entidad federativa; para cada innovación se registró de quién(es) se aprendió (nombre), el tipo de actor y el año de adopción. El presente estudio se centra exclusivamente en la innovación Fertilización (NPK), registrada de forma agregada como la aplicación de fertilizantes minerales que aportan nitrógeno, fósforo y potasio al cultivo de maíz; por ello, no se distinguieron productos comerciales específicos, marcas, dosis o formulaciones. El tamaño de muestra (n = 37 078) corresponde a la totalidad de encuestas válidas disponibles para las entidades analizadas, derivadas del operativo del programa (muestreo no probabilístico por conveniencia).

En la base analizada, 19 372 productores reportaron adopción de la fertilización NPK (52.24%). La muestra incluyó 21% mujeres y 79% hombres; el perfil sociodemográfico se caracterizó por una mediana de edad de 63 años ($Q1-Q3$: 53-72) y una mediana de escolaridad de 4 años ($Q1-Q3$: 2-6). En la unidad de producción, la superficie sembrada presentó una mediana de 2 ha ($Q1-Q3$: 1-3) y el rendimiento de maíz grano presentó una mediana de 3 t/ha ($Q1-Q3$: 1.5-5). Predominaron el régimen de temporal (94%) y la propiedad propia (98%); respecto al equipamiento, el uso de maquinaria fue principalmente rentada (56%), seguido de no usa/no aplica (35%). En términos de destino de la producción, se observó un marcado componente de subsistencia: el autoconsumo registró una mediana de 100% ($Q1-Q3$: 20-100) y, cuando existió excedente, éste se destinó a la comercialización.

La variable de resultado fue el año de adopción de la fertilización NPK. La variable explicativa fue el actor-fuente a través del cual el productor aprendió la innovación, clasificado según el catálogo del instrumento: ER (Productor Encuestado), CI (Cliente Intermediario), ERe (Productor Referido No Encuestado), CA (Centro de Acopio/Comercial/Agroindustria), PI (Proveedor de Insumos), FM (Funciones Múltiples; p. ej., Productor y Proveedor de Insumos), PE (Proveedor de Equipo), OR (Organización de Productores), PG (Proveedor de Genética), CF (Consumidor Final), PSP (Extensionista), FAM (Familiar), PF (Proveedor de Servicios Financieros), MQ (Maquilador), IE (Institución de Enseñanza e Investigación), NP (No Productor) e IG (Institución Gubernamental).

Procedimiento analítico para la difusión de la innovación

En términos operativos, se distinguió entre adopción y difusión de la innovación: Adopción se definió como la decisión individual observada por el año de inicio de implementación reportado por cada productor; difusión se entendió como la propagación social agregada en el tiempo, aproximada mediante la acumulación anual de eventos de adopción y la distribución de tipos de actor reportados (Rogers 2003). Con esta delimitación, el análisis examinó cómo los mecanismos institucionales de transferencia y los vínculos interpersonales se articulan para explicar las trayectorias temporales y la heterogeneidad territorial observadas.

El análisis fue descriptivo-temporal y se ejecutó por estado siguiendo un flujo único. Primero, se filtraron los casos con adopción de la fertilización NPK, se ordenaron por año y se clasificaron en las etapas de adopción del marco de Rogers (2003) en innovadores 2.5%, adoptantes tempranos 13.5%, mayoría temprana 34%, mayoría tardía 34%, y rezagados 16%, aplicadas dentro de cada estado sobre la lista cronológica. Con esa misma secuencia se construyó la curva de adopción acumulada (en "S") para identificar periodos de crecimiento e inflexiones. Segundo, se estimó la distribución de productores por estado y etapa, reconociendo la concentración relativa del proceso. Tercero, se focalizó la cohorte de innovadores y se caracterizaron los actores-fuente que señalaron como difusores iniciales, para seguir la trayectoria desde la introducción hasta los primeros contagios. Cuarto, se integraron los estados para comparar, por etapa, la participación de los tipos de actores referidos por los productores y valorar su peso en la evolución de la difusión. En las visualizaciones se resaltó 1990 como referencia de crecimiento rápido para contrastar asincronías entre entidades. Este encadenamiento evitó redundancias, preservó la historicidad del año de adopción y ofreció una base coherente para interpretar similitudes y diferencias territoriales

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las trayectorias acumuladas por estado mostraron el patrón sigmoideo esperado, presentando un arranque lento, un despegue concentrado entre finales de los años 80 y principios de los 2000, y una desaceleración posterior conforme disminuye el contingente de adoptantes (Figura 2). Este comportamiento agregado convive con disparidades, mientras entidades como Chiapas (CHP) y Guerrero (GRO) con inicios tempranos alcanzaron pendientes más pronunciadas en mayor tiempo, otras como Campeche (CAM) y Quintana Roo (ROO) con inicios tardíos acumularon adopciones en menor tiempo. La lectura indica asincronías claras en los calendarios de incorporación; en varios estados el despegue ocurre alrededor de 1990, mientras en otros se posterga una década o más, lo que sugiere entornos de decisión y oportunidades de acceso diferenciados a lo largo del tiempo.

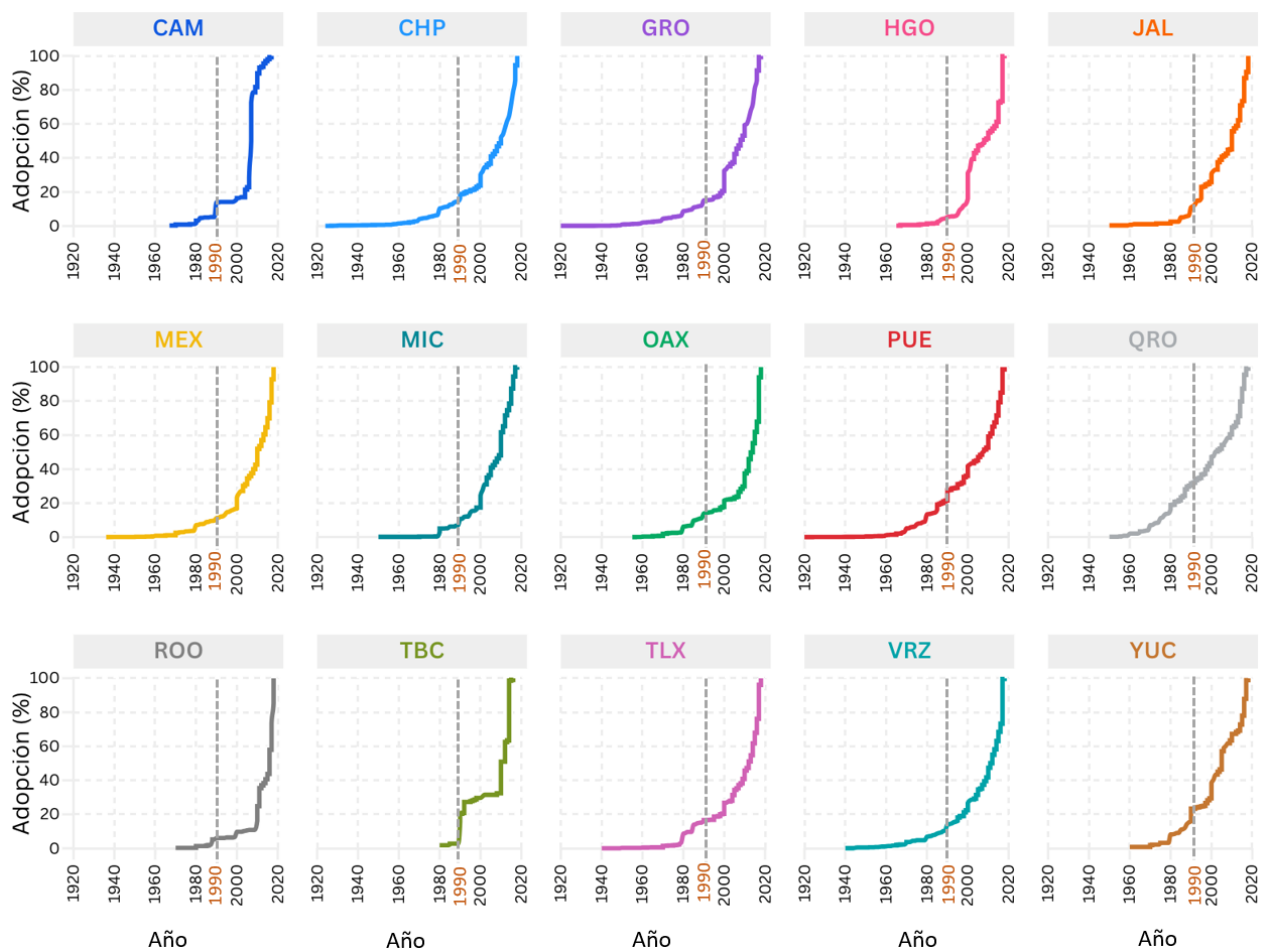


Figura 2. Trayectorias estatales de adopción acumulada de fertilización NPK. Nota: Cada curva en “S” muestra el porcentaje acumulado entre encuestados que reportaron iniciar NPK por año. La línea discontinua marca 1990 como referencia del punto de inflexión.

La coincidencia de inflexiones alrededor de 1990 se alinea con un cambio estructural del entorno de insumos: A inicios de esa década, México transitó hacia una mayor apertura comercial y liberalización del mercado, lo que aumentó la disponibilidad y la competencia en fertilizantes y generó señales de precio más intensas para los productores (Álvarez-González *et al.* 2023). La

literatura documenta que las trayectorias de uso de fertilizantes responden con sensibilidad a reconfiguraciones de mercado, políticas de apoyo/retiro de apoyos y interrupciones de oferta y costos energéticos (Adenäuer *et al.* 2024, FAO 2025); estos factores pueden adelantar o aplanar la pendiente de la “S” y, por tanto, explicar divergencias estatales en el ritmo de adopción. En el caso mexicano, la apertura derivada del TLCAN en 1994 y la progresiva mayor dependencia de importaciones en décadas posteriores encajan con el despegue observado entre 1980 y 2000. La evidencia muestra una elevada proporción de consumo abastecida por importaciones y una dinámica de precios y disponibilidad vinculada a shocks globales, lo que refuerza la plausibilidad del vínculo entre reformas de los noventa y aceleración de la adopción (Jones y Deuss 2024).

Las diferencias en la forma de las curvas entre estados -pendientes abruptas frente a crecimientos graduales- son coherentes con mecanismos de aprendizaje social y contagio complejo en redes locales. Cuando la información técnica se canaliza hacia agricultores con alta centralidad, la difusión se acelera y se sostiene; en cambio, el goteo interpersonal sin nodos estratégicos produce un crecimiento más extendido y de menor pendiente. Evidencia experimental muestra que focalizar nodos centrales eleva la adopción y anticipa los despegues observados (Beaman *et al.* 2021). Mientras que, la heterogeneidad espacial y temporal es consistente con la estructura del comercio internacional de fertilizantes: La centralidad de pocos exportadores, la persistencia y variabilidad de los enlaces comerciales y la exposición a choques introducen asimetrías en acceso y precio a nivel estatal y nacional. Estudios de redes de comercio como el de Gutiérrez-Moya *et al.* (2023) documentan estas propiedades y aportan un mecanismo adicional para entender divergencias estatales en ritmos de adopción aún bajo una misma innovación.

La confirmación de curvas en “S” aportó un marco temporal común; para comprender cómo se pobló cada etapa de adopción en los territorios, se desagregó la acumulación y se analizó la densidad anual de productores por etapa en cada estado (Figura 3). Se observó la secuencia esperada: Los innovadores y adoptantes tempranos se concentraron antes de la masificación, con apariciones puntuales y de baja densidad; a partir de la década de 1990 predominaron las mayorías (temprana y tardía), lo que indicó validación social y contagio ampliado. Persistió la asincronía entre entidades: GRO mostró casos muy tempranos pero masificó tarde; PUE y CHP acumularon mayorías de forma marcada desde los noventa; QRO avanzó de manera gradual. La cola de rezagados se extendió después de 2000, coherente con incorporaciones tardías bajo condiciones de acceso más favorables. Estos patrones sugieren que, una vez alcanzada masa crítica, la difusión se aceleró por aprendizaje social: Cuando la información y la demostración práctica llegan a agricultores con alta centralidad relacional, la transición desde adoptantes tempranos hacia mayorías se comprime en el tiempo (Beaman *et al.* 2021). La forma y la densidad de los racimos por etapa en varios estados son coherentes con ese mecanismo micro de difusión dirigida en redes, que eleva la adopción y anticipa los despegues observados.

Al mismo tiempo, la secuenciación por etapas reflejó condiciones del entorno de insumos: Disponibilidad, precios y choques logísticos/energéticos modulan el acceso y desplazan la pendiente temporal de la adopción. Evaluaciones recientes sobre la resiliencia y el reacomodo de los mercados de fertilizantes muestran respuestas marcadas a interrupciones y cambios de política, lo que ayuda a explicar por qué algunos estados presentaron picos concentrados tras 1990 mientras otros mantuvieron trayectorias más graduales (FAO 2025, Jones y Deuss 2024). Además, la

estructura del comercio internacional de fertilizantes, con alta centralidad de pocos exportadores y vínculos persistentes, introduce asimetrías territoriales aguas abajo, consistentes con las diferencias de densidad por etapa entre entidades (Gutiérrez-Moya *et al.* 2023). La evidencia sectorial reciente confirma que estas dinámicas siguen activas y condicionan la oportunidad de adopción a nivel estatal (FAO 2020, 2025).

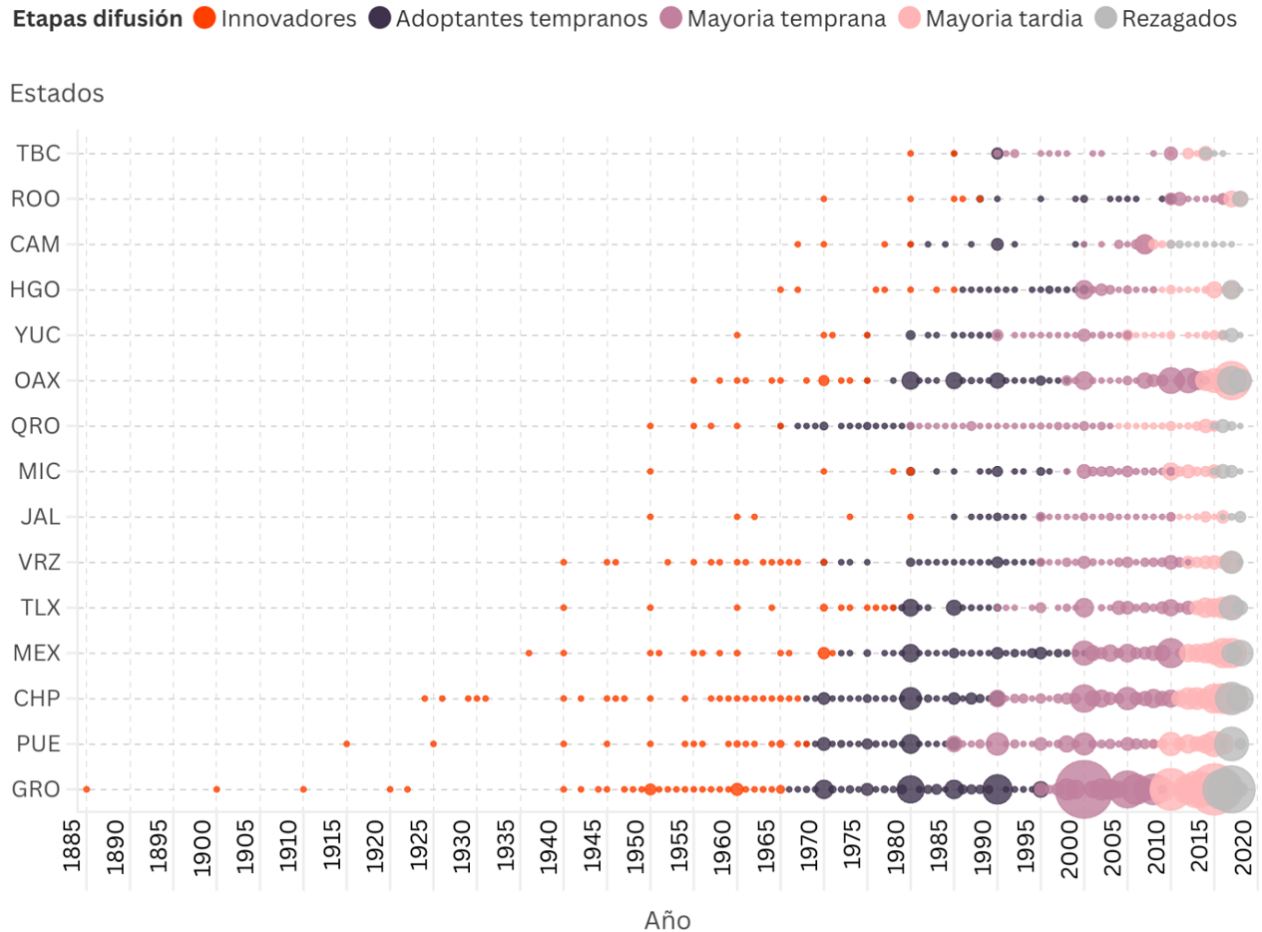


Figura 3. Distribución temporal de etapas de adopción de NPK (por estado). Nota: Cada punto representa productores que iniciaron en ese año; el color indica la etapa de difusión y el tamaño es proporcional a la concentración de productores.

Como puente desde la composición temporal por etapas, la Figura 4 se centró en quiénes fueron referidos por los innovadores como fuente inicial de información en cada estado. Esta vista permitió identificar los actores catalizadores de la difusión temprana y su evolución histórica. Se observó un patrón nítido. En las décadas más tempranas predominaron referencias a Institución Gubernamental (IG), Institución de Enseñanza e Investigación (IE) y Extensionista (PSP), acompañadas por menciones a Familiar (FAM) en varios estados. Esta combinación sugirió que la difusión entre innovadores se ancló en mecanismos institucionales de transferencia, campañas, demostraciones, asesoría técnica, y en lazos de confianza de corta distancia. Conforme avanzó la cronología, especialmente entre 1950 y 1980, aparecieron con mayor frecuencia actores vinculados al ecosistema comercial: Proveedores (PI y PF), Cliente Intermediario (CI) y Productores (ER, ERe

y OR). En entidades con despegues rápidos (p. ej. VRZ y TLX) se concentraron barras de estos actores en ventanas acotadas, mientras que en estados de adopción gradual (p. ej., GRO) las referencias se distribuyeron en periodos más largos. No todos los tipos de actores del catálogo estuvieron presentes entre innovadores (p. ej., CA, PE, PG, CF fueron escasos o nulos en esta cohorte), lo que indicó que la fase inicial se apoyó en un subconjunto de actores con mayor capacidad de señal y alcance.

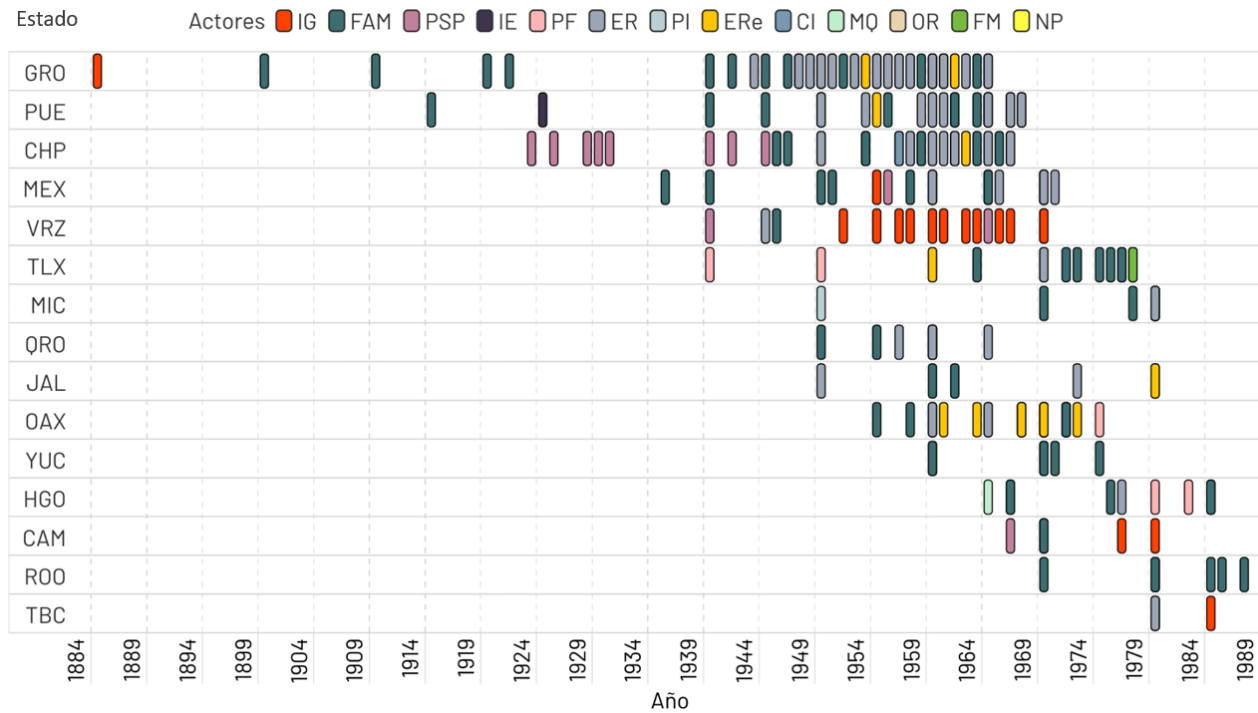


Figura 4. Actores fuente citados por productores innovadores, por estado y año. Nota: Cada marca coloreada corresponde al tipo de actor mencionado por los productores clasificados como innovadores en el año reportado. Un mayor número de marcas en una ventana temporal indica mayor frecuencia de menciones de ese actor como difusor inicial en el estado.

Estos patrones son coherentes con dos mecanismos que la literatura documenta para fases tempranas de difusión. Primero, la siembra estratégica de información en nodos centrales de las redes locales acelera la adopción posterior: Tanto experimentos en agricultura como ensayos de comunicación muestran que seleccionar informantes con alta centralidad, ya sean líderes comunitarios, prestadores de servicios o agentes con múltiples vínculos, incrementa la probabilidad de que la innovación se propague más allá del círculo inicial (Banerjee *et al.* 2019, Beaman *et al.* 2021). Segundo, la complementariedad entre transferencia institucional y canales comerciales resulta clave: a medida que el mercado de insumos se amplía, los proveedores y minoristas asumen funciones de asesoría y demostración que refuerzan la validación técnica y reducen costos de búsqueda para adopciones sucesivas (Adenäuer *et al.* 2024, Fabregas *et al.* 2019). En este marco, la persistencia de FAM como fuente entre innovadores subraya el papel de la confianza interpersonal para disminuir incertidumbre técnica y de resultados en etapas de alto riesgo percibido.

La transición observada de IG/IE/PSP hacia PI/CI/OR/ER en varias entidades sugiere que, una vez superada la fase de prueba, la disponibilidad y logística de insumos ganan protagonismo. La evidencia reciente sobre redes de comercio de fertilizantes muestra estructuras concentradas, enlaces persistentes y sensibilidad a choques, características que modulan la presencia efectiva de actores comerciales en territorio y, con ello, su papel como difusores en la frontera de la adopción (Adenäuer *et al.* 2024, Gutiérrez-Moya *et al.* 2023). En estados donde se densificaron barras de PI/CI/OR durante los años de despegue (como PUE, VRZ o TLX), la Figura 4 apunta a una interfaz más estrecha entre cadena de suministro y aprendizaje entre pares; donde prevalecieron IG/IE/PSP/FAM (como GRO, QRO o CAM), la difusión pareció descansar más en la transferencia pública y en validaciones locales antes de que el componente comercial tomara el relevo.

La Figura 5 representa la dinámica de las fuentes de información referidas por los productores en cada etapa de difusión. El ancho de cada banda cuantifica la proporción que ese actor representa como fuente para el 98% de las referencias válidas de cada etapa. En términos sustantivos, se observó un relevo secuencial de fuentes: En innovadores y adoptantes tempranos predominó FAM (55.2 y 48.0%, respectivamente), acompañada por ER e IG; en mayoría temprana lideró IG (31.1%), seguida por PI (17.4%) y ER/PSP/FAM con participaciones similares; en mayoría tardía y rezagados prevaleció PSP (30.3 y 60.4%, respectivamente), con IG y PI como apoyos relevantes. El patrón sintetiza el paso de la validación de proximidad (familia y vínculos locales) y el impulso institucional temprano hacia un escalamiento técnico-comercial en las fases finales.

La reconfiguración de fuentes refleja un encadenamiento funcional de mecanismos. Al inicio, la validación de proximidad -familia y redes íntimas- reduce la incertidumbre y habilita decisiones pioneras; la evidencia reciente diferencia observación en campo e intercambio verbal como canales de pares con efectos distintos sobre la adopción, donde la observación acorta el escepticismo técnico y la palabra de pares refuerza la disposición a probar cuando el riesgo percibido es alto (Massfeller y Storm 2024). Este rol de las redes locales es compatible con estudios que muestran que sembrar información en nodos centrales acelera la difusión y comprime el tránsito hacia las mayorías (Banerjee *et al.* 2019, Beaman *et al.* 2021).

En la transición a mayoría temprana, el mayor peso de IG sugiere procesos de estandarización y anclaje de credibilidad pública (normas técnicas, demostraciones, acompañamiento formal). Una vez que la demanda queda socialmente validada, los extensionistas (PSP) y los proveedores de insumos (PI) sostienen el escalamiento al bajar costos de búsqueda, asegurar disponibilidad y acompañar la implementación; de ahí su predominio en mayoría tardía y rezagados. Esta lectura coincide con síntesis sobre extensión pluralista -en la que lo público y lo privado son complementarios, no sustitutos- y con la recomendación de articular servicios técnicos y distribución cuando la tecnología ya alcanzó masa crítica (Fabregas *et al.* 2019). Al mismo tiempo, la estructura y las tensiones del mercado de fertilizantes condicionan la presencia territorial y la capacidad de arrastre de PSP/PI en fases tardías: Concentración de la oferta, enlaces comerciales persistentes y sensibilidad a choques logísticos-energéticos explican por qué algunos territorios descansan más en canales técnico-comerciales mientras otros retienen mayor peso institucional o de confianza (Adenäuer *et al.* 2024, Gutiérrez-Moya *et al.* 2023).

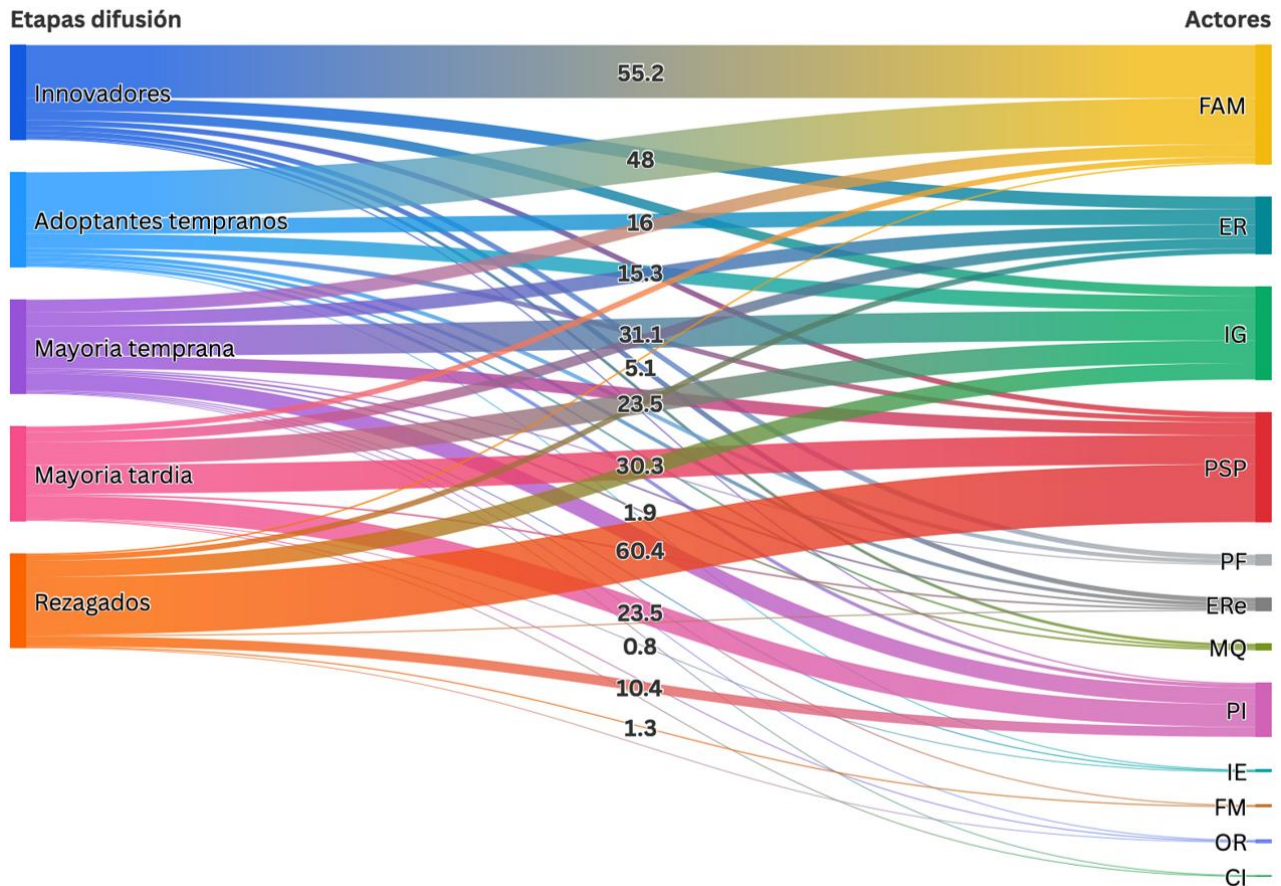


Figura 5. Flujo de fuentes por etapa de difusión. Nota: Diagrama de Sankey con etapas a la izquierda y actores a la derecha; el grosor de bandas y enlaces indica su peso relativo como fuentes reportadas por los productores. Se anotan los porcentajes de mayor contribución y se incluye el 98% de las fuentes. Abreviaturas según el catálogo del estudio: FAM (Familiar), ER (Productor), IG (Institución gubernamental), PSP (Extensionista), PI (Proveedor de insumos), entre otros.

En conjunto, el patrón temporal y el reordenamiento de fuentes sugieren una articulación secuencial entre mecanismos: la difusión interpersonal (en particular, redes familiares) opera como disparador inicial y facilita las primeras pruebas bajo condiciones de alta incertidumbre; posteriormente, la transferencia institucional adquiere mayor peso en la fase de transición, al reducir costos de información y acceso (asesoría, disponibilidad de insumos, legitimidad técnica), lo que favorece el paso desde adopciones puntuales hacia una adopción más extendida. En etapas tardías, la centralidad de extensionistas y proveedores es consistente con un proceso de consolidación operativa (acompañamiento, abasto y recomendaciones prácticas) más que de descubrimiento. Esta secuencia, iniciación social, escalamiento institucional y consolidación técnico-comercial, es congruente con las curvas sigmoideas observadas y ofrece una interpretación explicativa de las asincronías estatales: donde el componente institucional entra tarde o con menor intensidad, el umbral de transición se retrasa y la adopción permanece anclada en vínculos interpersonales.

Desde política pública, los hallazgos respaldan ajustar instrumentos al momento difusivo de cada territorio: En innovadores/adoptantes tempranos, conviene fortalecer redes locales de confianza y plataformas de aprendizaje horizontal como lo son las escuelas de campo, para que la validación ocurra dentro de las redes donde circula la confianza y el aprendizaje práctico; meta-evidencia reciente muestra que estas escuelas fortalecen capital humano y social (confianza, acción colectiva) y mejoran prácticas y resultados, favoreciendo adopciones sostenidas (Van den Berg *et al.* 2020). En la misma línea, Ruzzante *et al.* (2021) identifican las restricciones de información como barrera clave y subrayan el papel complementario del aprendizaje entre pares y la extensión para cerrar esas brechas. En la transición hacia mayoría temprana y en las fases de mayorías, es recomendable articular la extensión pública (IG/PSP) con proveedores de insumos (PI) para evitar cuellos de botella de disponibilidad y servicio posventa. Esto implica que, en programas de entrega directa de insumos evolucionar de un esquema vertical a otro que combine provisión con intercambio entre pares y nodos locales legitimados -“productores-innovadores”- que actúen como multiplicadores (Gardeazabal *et al.* 2023).

El análisis multiterritorial mostró que la adopción de la fertilización NPK en los sistemas maiceros de México siguió trayectorias temporales heterogéneas entre estados, coherentes con un proceso de difusión social y no con una dinámica agregada única; al descomponer la acumulación por etapas de Rogers, se identificaron transiciones y pausas que explican ritmos diferenciados de poblamiento de cohortes. El papel relativo de los mecanismos se ordenó de manera funcional: En innovadores y adoptantes tempranos la validación de proximidad en redes de confianza (familia y pares) redujo la incertidumbre; en la transición hacia la mayoría temprana la transferencia institucional aportó estandarización y credibilidad; y en mayoría tardía y rezagados los servicios técnico-profesionales y los canales comercial-logísticos sostuvieron el escalamiento al disminuir costos de búsqueda, garantizar disponibilidad y acompañar la implementación. Se desprende que la política y la extensión deben alinearse a la etapa y al territorio, articulando redes sociales, instituciones y mercado para asegurar pertinencia local. Se ofrece un marco reproducible que integra adopción (decisión individual - fecha de adopción), difusión (propagación social en el tiempo) y transferencia (mecanismos y actores), generando salidas trazables que vinculan cronología, etapas y fuentes de información; si bien el diseño es descriptivo y el año de adopción proviene de autorreporte, la consistencia entre visualizaciones y la cobertura territorial respaldan la solidez diagnóstica del enfoque.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las y los extensionistas que coordinaron y levantaron la encuesta en los 15 estados, así como a las y los productores de maíz que, con disposición y confianza, compartieron de manera voluntaria y anónima la información histórica sobre su adopción y las fuentes de aprendizaje. Reconocemos el acompañamiento institucional del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por su apoyo académico y logístico durante el trabajo de campo y la sistematización de la información.

CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara que no tiene intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Adenäuer M, Laget E, Cluff M (2024) Fertile futures: scenario analysis on the interconnected dynamics of fertiliser and agricultural markets. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/04/fertile-futures_e9cd3acd/b1606a57-en.pdf. Fecha de consulta: 11 de febrero de 2026.
- Ahmadi S, Amendolagine V, LaSala P (2025) Unpacking the impacts of digitalization of knowledge transfer in agri-food sector, through sociotechnical systems theory: a systematic literature review. *Agricultural and Food Economics* 13(1): 51. <https://doi.org/10.1186/s40100-025-00393-3>
- Álvarez-González X, García-Salazar JA, Omaña-Silvestre JM, Mora-Flores JS, Almeraya-Quintero SX, Borja-Bravo M (2023) Current and potential demand of fertilizers in Mexico. *Agro Productividad* 16(4): 149-156. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i4.2352>
- Banerjee A, Chandrasekhar AG, Duflo E, Jackson MO (2019) Using gossips to spread information: Theory and evidence from two randomized controlled trials. *The Review of Economic Studies* 86(6): 2453-2490. <https://doi.org/10.1093/restud/rdz008>
- Beaman L, BenYishay A, Magruder J, Mushfiq AM (2021) Can network theory-based targeting increase technology adoption? *American Economic Review* 111(6): 1918-1943. <https://doi.org/10.1257/aer.20200295>
- Bilal M, Jaghdani TJ (2024) Barriers to the adoption of multiple agricultural innovations: Insights from Bt cotton, wheat seeds, herbicides and no-tillage in Pakistan. *International Journal of Agricultural Sustainability* 22(1). <https://doi.org/10.1080/14735903.2024.2318934>
- Fabregas R, Kremer M, Schilbach F (2019) Realizing the potential of digital development: The case of agricultural advice. *Science* 366(6471). <https://doi.org/10.1126/science.aay3038>
- FAO (2020) Transforming agricultural research and extension systems. Unlocking the potential of agricultural innovation to achieve the sustainable development goals. Rome, Italy: FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca8737en>. Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2025.
- FAO (2025) Food Outlook - Biannual report on global food markets (June 2025). Rome, Italy: FAO. 136p. <https://doi.org/10.4060/cd5655en>
- Gao Y, Cabrera SA (2023) Greenhouse gas emissions from nitrogen fertilizers could be reduced by up to one-fifth of current levels by 2050 with combined interventions. *Nature Food* 4(2): 170-178. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00698-w>
- Gardeazabal A, Lunt T, Jahn MM, Verhulst N, Hellin J, Govaerts B (2023) Knowledge management for innovation in agri-food systems: A conceptual framework. *Knowledge Management Research & Practice* 21(2): 303-315. <https://doi.org/10.1080/14778238.2021.1884010>
- Gutiérrez-Moya E, Lozano S, Adenso-Díaz B (2023) A pre-pandemic analysis of the global fertiliser trade network. *Resources Policy* 85: 103859. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103859>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2023) Censo Agropecuario 2022: Resultados definitivos. Nacional. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/>. Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2025.

- Jones D, Deuss A (2024) Understanding the resilience of fertiliser markets to shocks: An overview of fertiliser policies. OECD Publishing. OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, No. 208. 69p. <https://doi.org/10.1787/43664170-en>
- Lasdun V, Harou AP, Magomba C, Guereña D (2025) Peer learning and technology adoption in a digital farmer-to-farmer network. *Journal of Development Economics* 176: 103496. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2025.103496>
- Massfeller A, Storm H (2024) Field observation and verbal exchange as different peer effects in farmers' technology adoption decisions. *Agricultural Economics* 55(5): 739-757. <https://doi.org/10.1111/agec.12847>
- Rockström J, Gupta J, Qin D, Lade SJ, Abrams JF, Andersen LS, Armstrong McKay DI, Bai X, Bala G, Bunn SE, Ciobanu D, DeClerck F, Ebi K, Gifford L, Gordon C, Hasan S, Kanie N, Lenton TM, Loriani S, Zhang X (2023) Safe and just Earth system boundaries. *Nature* 619(7968): 102-111. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8>
- Rogers EM (2003) Diffusion of innovations. 5th Edition. Editorial Free Press. New York, USA. 665p.
- Ruzzante S, Labarta R, Bilton A (2021) Adoption of agricultural technology in the developing world: A meta-analysis of the empirical literature. *World Development* 146: 105599. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105599>
- SAGARPA (2013) Acuerdo por el que se dan a conocer las reglas de operación del programa de fomento a la agricultura de la secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. Diario oficial de la federación. <https://sidof.segob.gob.mx/notas/docFuente/5327085>. Fecha de consulta: 11 de febrero de 2025.
- Shang L, Heckelei T, Gerullis MK, Börner J, Rasch S (2021) Adoption and diffusion of digital farming technologies - integrating farm-level evidence and system interaction. *Agricultural Systems* 190: 103074. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103074>
- Van den Berg H, Phillips S, Dicke M, Fredrix M (2020) Impacts of farmer field schools in the human, social, natural and financial domain: A qualitative review. *Food Security* 12(6): 1443-1459. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01046-7>
- Walsh M, Schenk G, Schmidt S (2023) Realising the circular phosphorus economy delivers for sustainable development goals. *Npj Sustainable Agriculture* 1(1): 2. <https://doi.org/10.1038/s44264-023-00002-0>