

Desplazamiento profesional y adopción de AgTech en el asesoramiento agrícola: un enfoque basado en agentes

Matías Micheletto  {mmicheletto@cenpat-conicet.gob.ar}

IIDEPyS - GSJ, UNPSJB-CONICET

Abstract. Este trabajo presenta un modelo basado en agentes para estudiar la dinámica del mercado de servicios profesionales de asesoramiento agrícola y su interacción con la evolución de la producción agropecuaria. El modelo representa dos tipos de agentes: productores agropecuarios, que toman decisiones sobre contratación de asesores, inversión y expansión de tierra, y profesionales agrónomos, que compiten por clientes mientras acumulan experiencia, ajustan honorarios y adoptan tecnología. Las decisiones de contratación se modelan mediante elección probabilística con racionalidad acotada, mientras que la productividad agrícola depende de la calidad del asesoramiento recibido. El sistema incluye además mecanismos de entrada y salida de profesionales mediante un pipeline educativo y reglas económicas de supervivencia. Se presentan los resultados de experimentos de simulación para un caso particular.

Keywords: Modelos basados en agentes, AgTech, Mercado laboral agrícola

Professional displacement and AgTech adoption in agricultural advisory services: an agent-based approach

Abstract. This paper presents an agent-based model to study the dynamics of the agricultural advisory services market and its interaction with the evolution of agricultural production. The model represents two types of agents: agricultural producers, who make decisions about hiring advisors, investing and expanding land, and agricultural professionals, who compete for clients while accumulating experience, adjusting fees and adopting technology. Hiring decisions are modelled using probabilistic choice with bounded rationality, while agricultural productivity depends on the quality of the advice received. The system also includes mechanisms for the entry and exit of professionals through an educational pipeline and economic rules of survival. Simulation experiments are presented for a particular case.

Keywords: Agent based modelling, AgTech, Agriculture advisory market

1 Introducción

La agricultura contemporánea se encuentra atravesando un proceso acelerado de transformación digital impulsado por el desarrollo de sensores remotos, sistemas de apoyo a la decisión, plataformas de datos y herramientas basadas en inteligencia artificial. Estas tecnologías permiten procesar grandes volúmenes de información agronómica y generar recomendaciones de manejo cada vez más precisas, modificando la forma en que el conocimiento técnico es producido, distribuido y utilizado dentro de los sistemas productivos.

Históricamente, el asesoramiento agronómico ha sido un componente central en la toma de decisiones de los productores agropecuarios. Los profesionales especializados cumplen un rol clave en la interpretación de información productiva, la planificación de estrategias de manejo y la transferencia de innovaciones tecnológicas. Sin embargo, la creciente disponibilidad de herramientas digitales plantea interrogantes acerca de cómo estas tecnologías podrían alterar la organización del mercado de servicios profesionales y el rol de los asesores humanos.

Desde una perspectiva económica, el progreso tecnológico puede generar simultáneamente efectos de aumento de productividad y procesos de sustitución laboral. En algunos casos, la tecnología actúa como complemento del trabajo humano; en otros, permite automatizar tareas previamente realizadas por profesionales especializados, reduciendo la demanda relativa de ciertos servicios. Este tipo de dinámicas ha sido ampliamente discutido en la literatura sobre innovación y empleo, particularmente en contextos donde la digitalización permite escalar el conocimiento experto [3].

El estudio de estos procesos resulta complejo debido a la interacción entre múltiples actores, incentivos económicos y mecanismos de aprendizaje. Los modelos basados en agentes constituyen una herramienta adecuada para analizar este tipo de sistemas complejos, ya que permiten representar individuos heterogéneos cuyas decisiones locales generan patrones agregados emergentes [1,2]. En el contexto agropecuario, este enfoque ha sido utilizado para estudiar procesos de adopción tecnológica, difusión de innovaciones y dinámicas de mercado.

En este trabajo se presenta un modelo basado en agentes que representa la interacción entre productores agropecuarios y profesionales de asesoramiento técnico dentro de un mercado competitivo. El modelo incorpora mecanismos de aprendizaje profesional, adopción de tecnología digital, competencia por clientes y expansión de la superficie agrícola. A partir de estas interacciones se analizan las condiciones bajo las cuales la incorporación de tecnologías digitales puede modificar la estructura del mercado de asesoramiento, generando cambios en la distribución de ingresos, la utilización de capacidad profesional y el número de profesionales activos.

Mediante experimentos de simulación se examina el impacto de distintos parámetros tecnológicos y económicos sobre los resultados agregados del sistema. El objetivo del trabajo es proponer un marco de análisis que permita comprender las posibles trayectorias de evolución del mercado de servicios profesionales en la agricultura, así como identificar los factores clave que podrían influir en la dinámica de desplazamiento profesional y adopción tecnológica. Este tipo de análisis resulta relevante para diseñar políticas públicas orientadas a facilitar la transición hacia sistemas productivos más

digitales e inclusivos, evitando efectos adversos sobre el empleo especializado en el sector agropecuario.

2 Formulación

El modelo propuesto representa un mercado de servicios de asesoramiento agronómico mediante un enfoque basado en agentes (ABM), siguiendo los principios de la economía computacional evolutiva [14]. En el sistema interactúan dos tipos principales de agentes: *profesionales* (consultores agronómicos) y *terratenientes o productores agropecuarios* (propietarios de tierra).

La dinámica del modelo se desarrolla en pasos discretos mensuales, notando como i a la base de tiempo, la cual describe la evolución conjunta del mercado de asesoramiento, la adopción tecnológica y la expansión de la superficie agrícola, permitiendo observar fenómenos emergentes derivados de la difusión de innovaciones [15].

En principio denominaremos T al conjunto total de productores y P al conjunto total de profesionales, tanto activos como desempleados. Se usará el subíndice t para los atributos pertenecientes a los productores, p para aquellos que corresponden a los profesionales y g para los parámetros globales del sistema. Podemos comenzar definiendo una de las variables más importantes del sistema: los recursos de producción. En este trabajo se utilizarán los términos “tierra” o “recursos de producción” (como maquinarias o infraestructura) de forma indistinta. Esta variable global se calcula como la agregación de la contribución de cada productor:

$$L_g = \sum_{t \in T} L_t, \quad t \in T \quad (1)$$

Más adelante, en la ecuación 25 de la sección 2.2 se describe el mecanismo de expansión de dichos recursos.

2.1 Profesionales

Los profesionales representan consultores que ofrecen servicios de asesoramiento a productores agropecuarios. Cada profesional posee atributos individuales como edad, experiencia, nivel de adopción tecnológica, honorarios y capacidad máxima de gestión de superficie.

Capacidad de gestión. La superficie actualmente gestionada por un profesional se define como la agregación del área de sus clientes:

$$A_{g,p} = \sum_{t \in C} L_t, \quad t \in C, \quad C \subseteq T, \quad (2)$$

donde el conjunto de clientes C , corresponde a los productores que han contratado a este profesional, siendo cada uno dueño de una superficie de campo L_t , tal como se mencionó antes.

La capacidad máxima de gestión $A_{\max,p}$ se modela considerando que el capital humano y el capital tecnológico son complementarios. Inspirado en la teoría de la capacidad de absorción [7], se asume que la tecnología potencia las habilidades preexistentes:

$$c_p = \beta_1 + \beta_2 \cdot \ln(1 + \xi_p) \quad (3)$$

$$A_{\max,p} = c_p \cdot e^{\beta_3 \cdot \tau_p^2} + \chi, \quad \chi \sim \mathcal{U}(-\beta_4, \beta_4), \quad (4)$$

donde c_p es la capacidad base que se relaciona con la experiencia ξ_p , la variable τ_p es el grado de adopción tecnológica y χ permite incorporar variaciones aleatorias para simular la naturaleza estocástica de la realidad.

Los valores de los parámetros β_1 a β_4 deben ajustarse para que el modelo refleje la realidad del sector. En particular, β_4 debe elegirse para que $A_{\max,p}$ no resulte negativo. La Figura 1 muestra la superficie máxima que un profesional puede gestionar en función de su experiencia y adopción tecnológica, con los parámetros ajustados a $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 15$ y $\beta_3 = 12$.

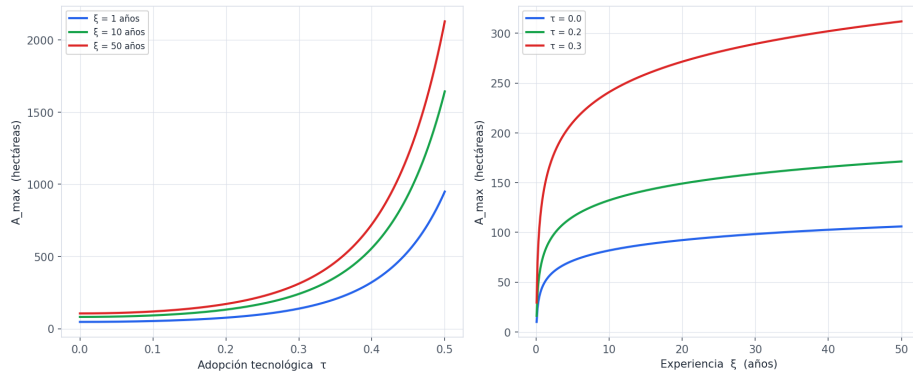


Figura 1: Capacidad de trabajo en función de la experiencia y adopción tecnológica.

Esta formulación refleja dos mecanismos principales: la experiencia ξ_p incrementa gradualmente la capacidad profesional siguiendo rendimientos marginales decrecientes [6], mientras que la adopción tecnológica τ_p amplifica dicha capacidad de forma exponencial, simulando el impacto de tecnologías como las basadas en IA en la automatización de tareas de monitoreo y diagnóstico.

Calidad del servicio. La calidad del servicio (QoS) percibida por los productores, notada como Q_p , es una función de la pericia técnica y el uso de herramientas de precisión:

$$Q_p = \text{clip}_{[0,1]} \left(1 - e^{-\beta_5 \cdot (\xi_p + \beta_6 \tau_p)} + \chi \right), \quad \chi \sim \mathcal{U}(-\beta_7, \beta_7). \quad (5)$$

Este indicador, que satura asintóticamente hacia la unidad, captura cómo la integración de tecnologías digitales permite estandarizar y elevar el nivel de asesoramiento, reduciendo la brecha entre profesionales novatos y expertos [10]. Más adelante se detalla cómo impacta este indicador al momento de efectuarse la contratación del profesional por parte del productor.

Con valores de $\beta_5 = 0.015$ y $\beta_6 = 60$, un profesional con 20 años de experiencia y una adopción tecnológica del 50 % debería alcanzar una calidad de servicio que ronde 0.5 unidades. El valor de β_7 debe ser ajustado para reflejar la variabilidad observada en la percepción de calidad entre productores, por ejemplo, 0.05 para permitir una dispersión moderada.

Aprendizaje profesional. La experiencia evoluciona conforme al principio de *learning-by-doing* (aprender haciendo) [4]. Se asume que el aprendizaje es una función de la intensidad de la práctica y la plasticidad cognitiva del agente:

$$\omega_p = \frac{\ln(1 + A_{g,p})}{\ln(\beta_8)} \quad (6)$$

$$\alpha_{e,p} = e^{\left(-\frac{\alpha_p}{60 \times 12}\right)}, \quad (7)$$

donde ω_p representa el factor de trabajo, α_p es la edad del profesional y $\alpha_{e,p}$ modela el factor etario. Si se elige $\beta_8 = 50$, la gestión de una superficie de 50 hectáreas genera un factor de aproximadamente 1.

Entonces, introduciendo una tasa de aprendizaje γ_p , el incremento neto de experiencia se modela mediante una regla de ajuste hacia un límite superior basado en la maestría acumulada [5]:

$$\Delta \xi_p = \gamma_p \cdot \omega_p \cdot \alpha_{e,p} \cdot (\xi_{max,p} - \xi_p). \quad (8)$$

Este mecanismo refleja que la acumulación de conocimiento se desacelera con la edad y depende críticamente del volumen de hectáreas bajo asesoramiento.

Ingreso profesional. El beneficio económico neto η_p del profesional se deriva de la actividad de consultoría descontando los costos operativos κ_g de la tecnología adoptada:

$$\eta_p = A_{g,p} \cdot \phi_p \cdot \chi - \kappa_g \cdot \tau_p, \quad \chi \sim \mathcal{U}(0.8, 1.2), \quad (9)$$

donde ϕ_p representa los honorarios del profesional por área gestionada $A_{g,p}$ y el término χ captura la variabilidad estocástica en los cobros y contingencias operativas del mercado local. Nótese que κ_g es una constante global del sistema y se supone invariante a lo largo del tiempo. En este caso, las cotas superior e inferior de χ introducen una variación del 20 % alrededor del valor esperado.

Los profesionales ajustan sus honorarios ϕ_p en base al valor de dos componentes principales, los cuales son el factor de utilización deseado $u_{d,p}$ y el ingreso mínimo esperado $\eta_{min,p}$. Se emplean las variables temporales $\beta_{u,p}$ y $\beta_{\eta,p}$ para simplificar la ecuación:

$$\beta_{u,p} = A_{max,p} - A_{g,p} - u_{d,p} \quad (10)$$

$$\beta_{\eta,p} = \frac{\eta_p - \eta_{min,p}}{\eta_{min,p}} \quad (11)$$

$$\phi_{i+1,p} = \phi_{i,p} \cdot (1 + \beta_{u,p} + \beta_{\eta,p}) \quad (12)$$

Adopción tecnológica. La trayectoria de adopción tecnológica sigue la literatura de difusión de innovaciones, donde el incentivo económico y el perfil demográfico son determinantes [8].

En primer lugar se define una señal de inversión $\eta_{s,p}$ basada en la rentabilidad y un freno asociado a la edad del profesional $\alpha_{d,p}$:

$$\eta_{s,p} = \min(\beta_9, \max(0, \eta_p \cdot \beta_{10})) \quad (13)$$

$$\alpha_{d,p} = \frac{\alpha_p}{80 \times 12} \cdot \beta_{11}. \quad (14)$$

La tasa de adopción $\Delta\tau_p$ y el nivel tecnológico τ_p se actualizan siguiendo una lógica de difusión epidémica y de aprendizaje adaptativo [9]:

$$\Delta\tau_{i+1,p} = \text{clip}_{[0,0.05]} (\Delta\tau_{i,p} + \eta_{s,p} - \alpha_{d,p}) \quad (15)$$

$$\tau_{i+1,p} = \text{clip}_{[0,1]} (\tau_{i,p} + \beta_{12} \cdot \Delta\tau_{i+1,p}). \quad (16)$$

Este proceso modela la resistencia al cambio de los agentes de mayor edad y la aceleración de la adopción en profesionales con mayores excedentes financieros para inversión en AgTech.

Es posible lograr un comportamiento estable de adopción tecnológica con los parámetros ajustados a $\beta_9 = 0.004$, $\beta_{10} = 7 \times 10^{-6}$, $\beta_{11} = 0.005$ y $\beta_{12} = 0.08$. Estos valores permiten que la señal de inversión se mantenga dentro de límites razonables, mientras que el freno asociado a la edad introduce una dinámica realista de resistencia al cambio en profesionales de mayor edad.

2.2 Productores agropecuarios

Los productores actúan como demandantes de servicios profesionales con el objetivo de optimizar la productividad de sus activos biológicos y la sostenibilidad del suelo.

Producción agrícola. En el contexto de este modelo, el impacto del asesoramiento profesional se traduce en un incremento del rendimiento físico por hectárea, representado como un multiplicador $\lambda_{m,t}$ sobre la productividad base del suelo derivado del conocimiento técnico aplicado:

$$\lambda_{m,t} = \begin{cases} \lambda_t (1 + \beta_{13} \cdot Q_p) & \text{si contrata profesional,} \\ \lambda_t & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad (17)$$

donde el parámetro λ_t es propio del suelo que pertenece al productor. El valor de β_{13} permite controlar el impacto del asesoramiento profesional sobre la productividad, y se ajusta para reflejar la realidad del sector. Por ejemplo, con $\beta_{13} = 0.2$, un productor que contrata a un profesional con una calidad de servicio de $Q_p = 0.5$ experimentaría un aumento del rendimiento del 10 % en comparación con no contratar asesoramiento.

Cada vez que el área producida cambia, ya sea por operaciones de “compra” o “venta” (ver ecuación 25), este parámetro es levemente perturbado según:

$$\lambda_{i+1,t} = \lambda_{i,t} \cdot \chi, \quad \chi \sim \mathcal{U}(0.95, 1.05). \quad (18)$$

Capital y rentabilidad. El capital mensual η_t del productor queda determinado por la diferencia entre sus ingresos y sus costos. Los ingresos están dados por el precio de mercado μ_g de los commodities y el volumen de producción, mientras que los costos ρ_t se relacionan con los honorarios ϕ_p del profesional contratado (si lo hubiera) y un parámetro δ_g que modela gastos operativos. Tanto los ingresos como los costos son proporcionales a la escala de operación L_t .

$$\rho_t = \begin{cases} \phi_t \cdot \delta_g & \text{si contrata profesional,} \\ \delta_g & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (19)$$

$$\eta_{i+1,t} = \eta_{i,t} + (\lambda_{m,t} \cdot \mu_g - \rho_t) \cdot L_t. \quad (20)$$

Nótese que a diferencia del agente profesional, el valor η_t es acumulativo, mientras que en el anterior representa un flujo mensual. Si en un mes i el término de la derecha de la ecuación 20 es negativo, entonces el productor deja de contratar al profesional p , para reducir gastos en el mes siguiente. El valor de δ_g puede elegirse tal que un productor pueda subsistir con al menos $L_t = 1$. Por otro lado, cuando existe un excedente, el productor puede incrementar la superficie cultivada L_t .

Selección de profesionales. La decisión de contratación se aleja de la racionalidad perfecta, adoptando un enfoque de utilidad estocástica propio de la economía del comportamiento [11]. En este sentido, es apropiado mencionar que se emplea un parámetro denominado “probabilidad de reconsideración” π_t , que permite limitar la ejecución de la lógica de intento de contratación de un profesional. El valor de π_t puede obtenerse muestreando una distribución aleatoria al momento de crear los agentes que modelan a los productores, o bien usando un valor constante global π_g . Este término será aplicado más adelante, en la ecuación 23.

A continuación se detalla el procedimiento que define bajo qué condiciones un profesional puede ser contratado por un productor. En primer lugar se evalúa el costo relativo del servicio de un profesional ponderado por la calidad esperada según:

$$\psi_p = \frac{\phi_p}{1 + \beta_{14} \cdot Q_p}, \quad p \in D, \quad D \subseteq P. \quad (21)$$

Nótese que D es un subconjunto del total de profesionales disponibles en el mercado, lo que representa el hecho de que los productores tienen una capacidad de búsqueda

limitada. El tamaño de D es diferente para cada productor y se selecciona mediante distribución uniforme. El valor de β_{14} controla el peso que se le asigna a la calidad del servicio en la evaluación de la relación costo-beneficio. Por ejemplo, con $\beta_{14} = 0.1$, un profesional con una calidad de servicio de $Q_p = 0.5$ tendría un costo relativo de aproximadamente un 5 % menos que otro profesional con la misma tarifa pero sin calidad de servicio (es decir, $Q_p = 0$).

Dado que se busca minimizar ψ_p , se define la “utilidad profesional” como el inverso aditivo entre ψ_p y una componente aleatoria para simular fenómenos como la presencia de efectos no observables:

$$v_p = \chi - \psi_p, \quad \chi \sim \mathcal{U}(-0.1, 0.1). \quad (22)$$

Cuando el componente no observado de la utilidad sigue una distribución de Gumbel [13], las probabilidades de elección resultantes adoptan la forma logit multinomial utilizada en la teoría de elección discreta, equivalente a una transformación *softmax* de las utilidades.

A partir de aquí se define la probabilidad π_p de seleccionar a un profesional p mediante:

$$\pi_p = \begin{cases} \frac{\epsilon_p}{\sum_{p \in P} \epsilon_p} & \text{si } Q_p > Q_{th,p} \text{ y } \chi > \pi_g, \quad \chi \sim \mathcal{U}(0, 1) \\ 0 & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad (23)$$

donde ϵ_p es un peso exponencial asociado a la utilidad percibida de cada alternativa:

$$\epsilon_p = \exp\left(\frac{v_p - \max(v_p)}{\mathcal{T}}\right), \quad (24)$$

y $\mathcal{T}$ controla el nivel de heterogeneidad y ruido en las decisiones de los productores. Valores bajos de $\mathcal{T}$ implican elecciones más deterministas que aleatorias en la selección. Por su lado, $Q_{th,p}$ es un umbral de calidad de servicio que el profesional candidato debe superar para ser contratado por el productor.

Esta formulación permite representar racionalidad limitada e información imperfecta, manteniendo al mismo tiempo la consistencia probabilística entre las alternativas.

Expansión de recursos productivos. La dinámica de acumulación de recursos (o área cultivada) sigue una regla de umbral basada en la liquidez disponible. El crecimiento de la agregación de esta variable L_g definida en la ecuación 1 es discreto y responde a la rentabilidad acumulada de cada productor:

$$L_{i+1,t} = \begin{cases} L_{i,t} + \Delta L_g & \eta_t > \eta_{max,t} \\ L_{i,t} - \Delta L_g & \eta_t < \eta_{min,t} \\ L_{i,t} & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad t \in T \quad (25)$$

donde $\eta_{max,t}$ y $\eta_{min,t}$ son los umbrales de capital que determinan si un productor invierte en la compra una cantidad discreta ΔL_g de recursos a un precio ζ_g o se deshace de los mismos, en caso de necesitar capital para continuar con su actividad. Entonces $\eta_{i+1,t} = \eta_{i,t} - \zeta_g$ si el productor compra recursos, o $\eta_{i+1,t} = \eta_{i,t} + \zeta_g$ si vende.

Este proceso permite capturar la consolidación parcelaria impulsada por las mejoras tecnológicas en la gestión del asesor profesional.

2.3 Dinámica agregada

El sistema se cierra con un entorno macroeconómico y demográfico profesional. El precio del *commodity* μ_g se asume exógeno y evoluciona estocásticamente, al igual que el precio de la tierra ζ_g :

$$\mu_{i+1,g} = \max(\mu_{\min,g}, \mu_{i,g} \cdot \chi), \quad \chi \sim \mathcal{U}(0.95, 1.05). \quad (26)$$

$$\zeta_{i+1,g} = \max(\zeta_{\min,g}, \zeta_{i,g} \cdot \chi), \quad \chi \sim \mathcal{U}(0.95, 1.05). \quad (27)$$

Finalmente, el mercado de servicios se regula mediante la entrada de nuevos competidores Ω al conjunto P , cuya tasa de matriculación universitaria es sensible a las señales s de rentabilidad del sector profesional:

$$s = \tanh\left(\frac{\bar{\eta}_P - \beta_{15}}{\beta_{16}}\right), \quad \bar{\eta}_P = \sum_{p \in P} \frac{\eta_p}{P} \quad (28)$$

$$\Omega = \max(0, 5 + \lfloor 10 \cdot s \rfloor). \quad (29)$$

Esta función de oferta de trabajo con retardo temporal simula el ciclo de formación académica de 48 meses antes de la incorporación plena al mercado laboral. Usando los valores $\beta_{15} = 1500$ y $\beta_{16} = 800$ se obtiene una tasa de entrada que varía entre 5 y 15 nuevos profesionales por mes, dependiendo de la rentabilidad promedio del sector. Este mecanismo introduce una retroalimentación entre la dinámica de ingresos de los profesionales y la oferta laboral futura, permitiendo observar fenómenos como la saturación del mercado o el efecto desplazamiento a largo plazo.

Se puede suponer que los graduados ingresan al mercado laboral con una distribución uniforme de edades entre 23 y 27 años, un valor de experiencia nulo y una tasa de adopción tecnológica de base τ_g que se va incrementando a lo largo del tiempo. Esto último intenta simular el hecho de que existe un avance tecnológico a nivel global que es adoptado por los nuevos graduados también.

$$\alpha_p \sim \mathcal{U}(23, 27) \cdot 12 \quad (30)$$

$$\xi_p = 0 \quad (31)$$

$$\tau_p \sim \mathcal{U}(\tau_g, \tau_g + 0.1) \quad (32)$$

$$\tau_{i+1,g} = \tau_{i,g} + 0.01 \quad (33)$$

3 Resultados

Los parámetros de la corrida de referencia se presentan en el Cuadro 1. La simulación considera 240 meses (20 años), 500 productores y una dotación inicial de 60 profesionales.

Cuadro 1: Parámetros del sistema

Parámetro	Valor	Descripción
Globales		
T	500	Cant. productores
P_o	60	Cant. inicial profesionales
$P_{o,jr}$	30 %	Profesionales Jr.
$P_{o,ssr}$	50 %	Profesionales Ssr
μ_g	450	Precio commodities
ζ_g	500	Precio tierra
ΔL_g	5	Incremento sup. campo
κ_g	20	Costo tecnología
$\tau_{o,g}$	0.4	Adopción tec. base
Profesionales		
$\xi_{o,p}$	$\mathcal{U}(0.01, 0.05)$	Experiencia inicial
$\phi_{o,p}$	$\mathcal{L}(\mu = 3.4, \sigma = 0.2)$	Honorarios iniciales
$\phi_{min,p}$	$\mathcal{U}(8, 10)$	Ingreso mínimo
$\phi_{th,p}$	$\mathcal{U}(2, 3)$	Tolerancia retiro
$u_{d,p}$	$\mathcal{U}(0.7, 0.8)$	Utilización deseada
$\tau_{o,p}$	$\mathcal{L}(\mu = -0.8, \sigma = 0.3)$	Adopción tec. inicial
$\Delta \tau_{o,p}$	$\mathcal{U}(0, 0.02)$	Tasa adopción tec.
$\alpha_{o,p}$	$\mathcal{U}(25, 60)$	Edades iniciales
$\alpha_{r,p}$	$N(\mu = 70, \sigma = 5)$	Edad jubilación
Productores		
$\eta_{o,t}$	$\mathcal{L}(\mu = 9.5, \sigma = 0.5)$	Capital inicial
sc_t	$\mathcal{U}(5, 10)$	Cap. búsqueda prof.
$Q_{th,p}$	0.2	Umbral QoS
π_g	0.15	Prob. actualización contrato

3.1 Dinámica de la fuerza laboral

La evolución del número de profesionales activos por cohorte revela tres fases bien diferenciadas a lo largo del horizonte de simulación (Figura 2).

En la **fase inicial** (meses 0–35), el sistema parte de una dotación de 60 profesionales activos distribuidos entre las tres cohortes, con predominio de profesionales semi-seniors ($|P_{ssr}| = 20$) y una presencia menor de seniors ($|P_{sr}| = 3$). En este período, la alta capacidad de asesoramiento relativa a la demanda inicial genera una ratio de cobertura $\sum_p A_{g,p}/L_g \approx 0.87$, indicando que la mayor parte de la superficie agrícola recibe servicio profesional. Sin embargo, esta sobrecapacidad inicial deteriora rápidamente los ingresos de los profesionales menos establecidos: los juniors y semi-seniors, con honorarios altos pero baja calidad de servicio Q_p , pierden competitividad frente a los productores que, racionalmente, prefieren profesionales de mayor trayectoria. Esto genera una primera oleada de salidas que reduce el plantel activo a un mínimo de 2 profesionales en el mes 53.

La **fase de reestructuración** (meses 36–120) se caracteriza por una recuperación gradual protagonizada principalmente por la cohorte senior. Los profesionales más experimentados, con mayor ξ_p y niveles tecnológicos τ_p crecientes, consolidan su posición en el mercado al ofrecer mejor relación calidad-costo según la métrica ψ_p . El

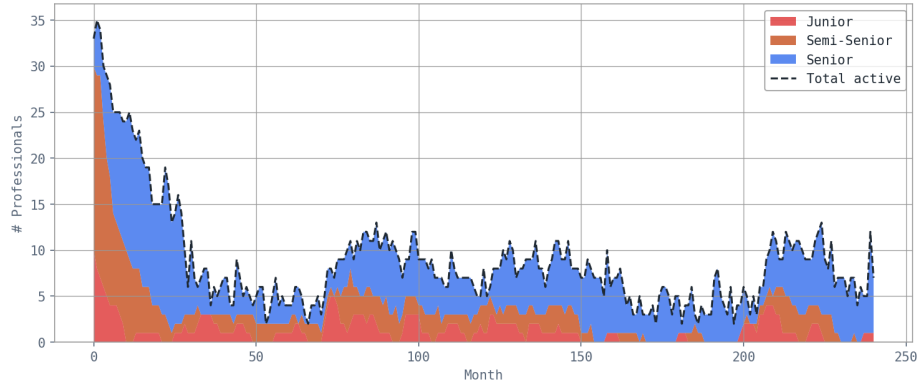


Figura 2: Evolución de profesionales activos por cohorte.

plantel activo total se recupera hasta aproximadamente 10 profesionales hacia el mes 90–100, alcanzando valores de utilización de capacidad $A_g/A_{\max} \approx 1.1$ en ese período, lo que indica que el sistema experimenta temporalmente un exceso de demanda no cubierta. Los egresados del *pipeline* universitario, cuya matriculación respondió a las señales de alta rentabilidad del período previo, comienzan a ingresar al mercado pero enfrentan las mismas barreras competitivas que limitaron a los juniors originales.

Finalmente, durante la **fase de largo plazo** (meses 120–240) se muestra una estabilización en torno a 5–8 profesionales activos, con la cohorte senior como dominante y una presencia marginal de juniors y semi-seniors.

3.2 Ingreso y adopción tecnológica

El ingreso promedio $\bar{\eta}$ muestra alta volatilidad, con picos iniciales debido a baja competencia, que luego inducen entrada de nuevos profesionales con retardo. En el largo plazo, oscila de forma irregular, reflejando un equilibrio dependiente de la trayectoria y concentración de la demanda.

Como puede observarse en la Figura 3, la adopción tecnológica promedio $\bar{\tau}$ crece sostenidamente (de 0.16 a 0.46), con mayor dinamismo en la fase de reestructuración. Este aumento responde tanto al aprendizaje individual como a un efecto de selección que favorece a profesionales con mayor τ_p .

3.3 Superficie y cobertura del mercado

La superficie agrícola total L_g muestra un crecimiento sostenido durante la primera mitad del horizonte simulado y una desaceleración posterior (Figura 4). El valor inicial de $L_g \approx 89.000$ ha se duplica hacia el mes 120 alcanzando aproximadamente 192.600 ha, y continúa creciendo hasta 213.000 ha en el mes 240, lo que representa un incremento total del 139 % respecto al estado inicial.

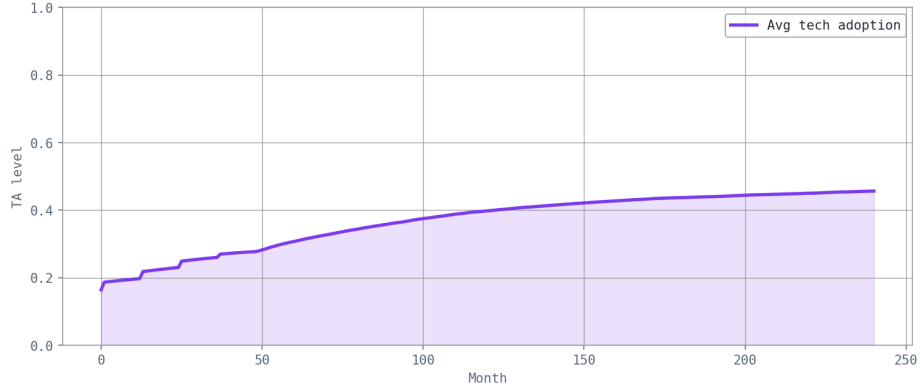


Figura 3: Adopción tecnológica promedio.

En contraste, la cobertura $\sum_p A_{g,p}/L_g$ cae desde valores cercanos a 1 a niveles inferiores al 10 %, evidenciando que la expansión agrícola supera la capacidad de asesoramiento. Aunque la productividad individual aumenta (τ_p), la reducción del número de profesionales domina el resultado agregado.

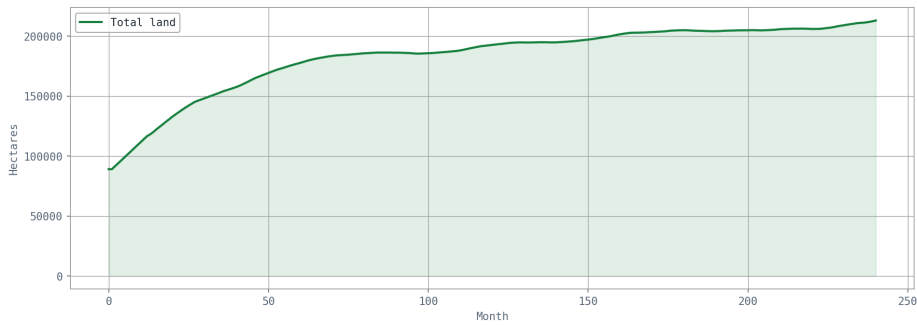


Figura 4: Superficie agrícola total.

Este resultado ilustra una de las tensiones centrales del modelo: el crecimiento de la frontera agrícola supera ampliamente la capacidad de asesoramiento disponible. Si bien los profesionales que permanecen activos gestionan superficies mayores gracias al aumento de τ_p —que eleva $A_{\max,p}$ exponencialmente—, la reducción drástica en el número de profesionales activos más que compensa esta ganancia de productividad individual, resultando en una cobertura agregada sistemáticamente baja.

La utilización de capacidad $A_g/A_{\max}$ presenta un patrón complementario: en los primeros meses, los valores superiores al 200 % señalan que la demanda excede ampliamente la capacidad instalada del sistema, lo que es consistente con la caída acelerada

de juniors y semi-seniors que no pueden absorber la demanda que se les asigna. A partir del mes 36, la utilización converge hacia un rango del 40–90 %, indicando que los profesionales supervivientes operan con cierto margen de capacidad ociosa, coherente con la configuración de mercado de pocos competidores con alta capacidad individual.

3.4 Patrones emergentes

El conjunto de resultados revela dos patrones emergentes de interés. En primer lugar, el sistema converge hacia una **estructura oligopólica de asesoramiento**: desde una dotación inicial de más de 30 profesionales activos, el mercado se estabiliza en torno a 5–8 agentes con alta experiencia y elevada adopción tecnológica que concentran la demanda disponible. Este proceso de selección no es planificado, sino que emerge de las reglas locales de contratación, ajuste de honorarios y salida por rentabilidad insuficiente.

En segundo lugar, se observa una **brecha estructural de cobertura**: incluso cuando el número de profesionales activos se recupera parcialmente en la segunda mitad de la simulación, la fracción de tierra asesorada $\sum_p A_{g,p}/L_g$ no supera el 10 % en el largo plazo. Esta divergencia entre la expansión de la frontera agrícola y la capacidad de asesoramiento disponible constituye el principal resultado de política del modelo, sugiriendo que la mejora tecnológica individual —sin un aumento paralelo en el número de profesionales— no alcanza para sostener niveles de cobertura aceptables ante una base productiva en expansión.

4 Conclusiones

Este trabajo presentó un modelo basado en agentes (ABM) diseñado para analizar la dinámica del mercado de asesoramiento agrícola frente a la creciente adopción de tecnologías digitales e IA. El modelo captura eficazmente la co-evolución entre la oferta profesional —caracterizada por procesos de aprendizaje y adopción tecnológica— y una demanda dinámica impulsada por la expansión de la superficie productiva. A través de este enfoque, ha sido posible identificar patrones emergentes que vinculan la micro-conducta de los agentes con indicadores agregados de empleo y rentabilidad.

Los resultados de las simulaciones sugieren que la transformación digital actúa como un catalizador de cambios estructurales en el mercado laboral agronómico. Se observó que el aumento en la productividad individual, derivado de la adopción de herramientas de IA, permite una mayor escala de gestión por profesional, lo que induce una tendencia hacia la concentración del mercado. Este fenómeno plantea un riesgo de desplazamiento laboral en escenarios donde la expansión de la frontera agrícola es más lenta que la tasa de crecimiento de la capacidad técnica. En términos económicos, el modelo corrobora que la digitalización no solo mejora la calidad del servicio (QoS), sino que reconfigura las barreras de entrada y la distribución de excedentes entre los profesionales.

Finalmente, el modelo se alinea con la literatura de innovación tecnológica al evidenciar que el progreso técnico en el sector agropecuario opera bajo una lógica de sustitución de tareas y reconfiguración de roles. Como herramienta exploratoria, este trabajo sienta las bases para futuros desarrollos que incluyan mayor heterogeneidad en el comportamiento de los productores y la distinción entre tecnologías disruptivas y

marginales. Tales extensiones permitirán diseñar políticas públicas y programas de formación profesional adaptados a un mercado laboral agrícola mediado por la inteligencia artificial.

Referencias

1. Axelrod, R. (1997). Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences (p. 21–40). *Simulating Social Phenomena*. Springer.
2. Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems (p. 7280–7287). *Proceedings of the National Academy of Sciences*. DOI: 10.1073/pnas.082080899.
3. Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review (p. 69–80). *Agricultural Systems*. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.
4. Arrow (1962). The Economic Implications of Learning by Doing (pp. 155–173). *Review of Economic Studies*. DOI: 10.2307/2295952
5. Young, H. P. (2009). Learning by Trial and Error (p. 626–643). *Games and Economic Behavior*. DOI: 10.1016/j.geb.2008.02.011.
6. Griliches, Z. (1998). R&D and Productivity: The Econometric Evidence (pp. 35–68). University of Chicago Press. DOI: 10.7208/chicago/9780226308906.001.0001
7. Cohen, W., & Levinthal, D. (1990). Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation (pp. 128–152). *Administrative Science Quarterly*. DOI: 10.2307/2393553
8. Rogers, E. (2019). *Diffusion of Innovations* (pp. 221–266). Free Press. DOI: 10.4324/9780203710753-35
9. Bass, F. (2004). A New Product Growth Model for Consumer Durables (pp. 215–227). *Management Science*. DOI: 10.1287/mnsc.1040.0264
10. Hall, B., & Khan, B. (2005). Adoption of New Technology (pp. 1–43). NBER Working Paper. DOI: 10.3386/w9730
11. McFadden, D. (1974). Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior (pp. 105–142). In *Frontiers in Econometrics*.
12. Train, K. (2009). *Discrete Choice Methods with Simulation* (pp. 15–44). Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511805271
13. Fisher, R. A., & Tippett, L. H. C. (1928). Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 24(2), 180-190.
14. Tesfatsion, L. (2006). Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory. En L. Tesfatsion & K. L. Judd (Eds.), *Handbook of computational economics: Agent-based computational economics* (Vol. 2, pp. 831-880). DOI: 10.1016/S1574-0021(05)02016-2
15. Berger, Thomas. (2001). Agent-based spatial models applied to agriculture: A simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics*. 25. 245-260. DOI: 10.1016/S0169-5150(01)00082-2.
16. Saltelli, Andrea & Ratto, M. & Andres, Terry & Campolongo, Francesca & Cariboni, Jessica & Gatelli, Debora & Saisana, Michaela & Tarantola, Stefano. (2008). *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. 10.1002/9780470725184.ch6.