

Propagación de Nuevas Tecnologías en el Agro: un análisis de Aglomeración en Cultivos mediante Autómatas Celulares.

Julián Aramburu, Pablo E. Warnes
Universidad de San Andrés

Resumen

En el siguiente trabajo se pretende estudiar la formación de cooperativas en zonas rurales donde la extensión promedio de las explotaciones agrícolas permite que existan ventajas en la aglomeración de cultivos. Estas cooperativas pueden ser entendidas como una condensación de productores en una misma tecnología de producción agrícola, de esta forma, el proceso de formación de cooperativas es un tipo de proceso de difusión tecnológica. Para estudiar este fenómeno se recurre a un modelo de Autómatas Celulares, pudiendo representar así de forma gráfica una simplificación del proceso de aglomeración en cooperativas de un mismo cultivo.

1. Introducción

La transformación tecnológica es un proceso fundamental del desarrollo económico. Dado que las características de la nueva tecnología son difícilmente transparentes y enteramente conocidas para el agente, su aprendizaje se da conjuntamente con su adopción. Si los que adoptan la nueva tecnología son múltiples agentes y en similares circunstancias, lo cual es un rasgo usual en las innovaciones tecnológicas, entonces el proceso de aprendizaje de la misma se vuelve un proceso social. Cada nuevo usuario aprenderá de los otros agentes las características de la tecnología recientemente empleada.

Reiteradas veces, y particularmente para el sector agrícola, una innovación tecnológica se ve acompañada por un proceso en el que la adopción y aprendizaje de nuevas tecnologías se da de manera simultánea por múltiples agentes. Ya sea por el aprovechamiento de economías de escala, el surgimiento de complementariedades estratégicas, o alguna otra razón, es común observar que son varios los agentes en una misma área geográfica que experimentan e innovan con nuevas tecnologías –fertilizantes, semillas de alto rendimiento, por ejemplo– (Besley y Case (1994)). Una de entre varias consecuencias observacionales de este fenómeno puede contemplar la formación de cooperativas de productores agropecuarios: las mismas conforman asociaciones autónomas de agentes que

comparten una misma actividad, y la administran y gestionan de forma tal que acuerden todos sus socios. La cooperativa constituye la forma más difundida de entidad de economía social.

Teniendo esto en cuenta, la motivación principal de nuestro trabajo es el caso particular de distintas cooperativas destinadas a actividades agrícolas innovadoras que han sido fundadas o han experimentado un crecimiento marcado durante estos últimos años en la provincia de Mendoza. El aumento en el número de cooperativas dedicadas a cultivos nuevos en esa zona puede interpretarse como la expresión de un fenómeno subyacente caracterizado por el hecho de que una nueva tecnología se difunde y se adopta conjuntamente por productores pertenecientes a una misma área geográfica.

Según los últimos datos recolectados (2009), en Argentina existen unas 13.000 cooperativas registradas que reúnen a casi 9.400.000 socios y dan empleo directo a más de 265.000 personas. De ese total de cooperativas, el 26 % son asociaciones cuya actividad principal se enmarca en el sector agropecuario (segundo en importancia luego del sector de Servicios Públicos, que engloba el 35 % del total de cooperativas)¹.

Para el caso de Mendoza, dentro de las cooperativas con actividades relacionadas al sector agropecuario se encuentran algunas dedicadas a la producción y comercialización de cultivos “clásicos” para la zona, como la vid. De acuerdo al Instituto Nacional de Vitivinicultura (INV²), en 2012 aumentó el porcentaje de quintales de uva que ingresaron para su elaboración a las cooperativas de Mendoza.

De mayor interés para este trabajo resulta la formación y el crecimiento de cooperativas que trascienden a los cultivos clásicos de Mendoza y reúnen a productores con tecnologías o cultivos modernos o innovadores. El portal web del INTA Mendoza, por ejemplo, destaca la formación de cooperativas dedicadas a la producción de melones, ajo y de claveles como cooperativas con cultivos y actividades novedosos y recientemente surgidos. La característica común de éstas es que engloban a pequeños productores con fincas de hasta siete hectáreas como máximo. A la hora de explicar su formación, se destaca que existen diversas ventajas que el pequeño y mediano productor valora y considera al elegir el cooperativismo. En primera instancia, la ventaja principal consiste en lograr que pequeños y medianos productores se posicionen en el mercado y se encuentren en condiciones de poder competir contra los grandes para trascender, a su vez, mercados locales. La garantía del cobro, el pago puntual y con valores superiores a los que paga el mercado, el seguro solidario por daños climáticos, la compra de insumos en escala a menor precio del mercado y con facilidades, la posibilidad de participar en capacitaciones y la asistencia financiera son otras de las ventajas que se destacan³.

Teniendo en cuenta esta motivación, el objetivo del presente trabajo consiste

¹Fuente: Instituto Nacional de Asociativismo y Economía Social (INAES): www.inaes.gov.ar. Ver sección “Estadísticas.”

²www.inv.gov.ar.

³<http://intainforma.inta.gov.ar/?p=4453>: “Melones: Superar la Economía Regional.” 24 de Enero de 2011.

en modelizar el proceso que subyace al fenómeno de la formación de cooperativas. Específicamente, se querrá modelizar un proceso en el cual productores de distintos cultivos maximizan beneficios tomando en consideración los cultivos de los productores vecinos. Aquí será de suma importancia el hecho de la disponibilidad y la difusión de información entre los agentes involucrados. Procesos en los que un gran número de productores en cercanía geográfica decidan producir el mismo cultivo (se denominará aglomeración) serán asociados a escenarios en los que la formación de cooperativas se vuelve más probable. La difusión de la información sobre las características de las nuevas tecnologías resulta ser un factor fundamental de la adopción conjunta de las mismas.

Cabe aclarar que lo que este trabajo analizará, sin embargo, no es la decisión de formar o no cooperativas. Lo que se estudiará es el proceso de decisión de los productores, el cual consistirá en elegir uno de entre tres cultivos posibles en función del conjunto informativo disponible al momento. Una vez tomada la decisión, la formación de cooperativas se supondrá automática en aquellos casos en los que la concentración de productores dedicados a un mismo cultivo es alta. Es decir, cuando se produzca un proceso de aglomeración en la producción de cada cultivo, la formación de cooperativas deviene de forma automática.

El análisis de la dinámica arriba descrita se realizará haciendo uso de un modelo de Autómatas Celulares (AA.CC. en adelante). Dichos modelos proveen un marco general para describir y analizar la dinámica de sistemas donde las partes actualizan su estado en función de las condiciones de su entorno. El caso a analizar se trata de uno con interacciones entre elementos en un contexto espacial: los elementos (o células) van a consistir en los productores o chacras, y la interacción entre ellos consistirá en el intercambio de información sobre las características de los cultivos que cada uno de ellos produce. Cada productor utiliza entonces información de un entorno relevante para él, la procesa y determina la actualización de su estado, que en nuestro caso consiste en el cultivo a producir.

De todas las aplicaciones que existentes de modelos de AA.CC., el trabajo que aquí se presenta muestra marcadas similitudes con el Modelo de Condensación. No obstante, las diferencias principales del mismo respecto al modelo básico de condensación son básicamente las siguientes: los estados de las células dejan de ser binarios (líquido o gaseoso) para dar lugar a tres posibles estados: cultivo 1, 2 o 3. La vecindad de cada célula o chacra es definida de forma más rica, dejando de ser el caso simple de las 8 células que la rodean. En particular cada chacra es influenciada por todas las demás, pero la intensidad de esa influencia decrece exponencialmente con la distancia entre las mismas. Al igual que en el modelo de condensación, la dinámica es asincrónica: en cada período una chacra al azar decide qué cultivo producir en base a la distribución de cultivos de las demás chacras en ese momento.

La similitud más notable de este trabajo con el modelo básico de condensación consiste en el reconocimiento de la existencia de un fenómeno de complementariedades estratégicas entre las células (chacras). Las ventajas que fueron mencionadas cuando se explicó la formación de cooperativas son los incentivos que harán que productores en zonas que domina un cultivo particular terminen

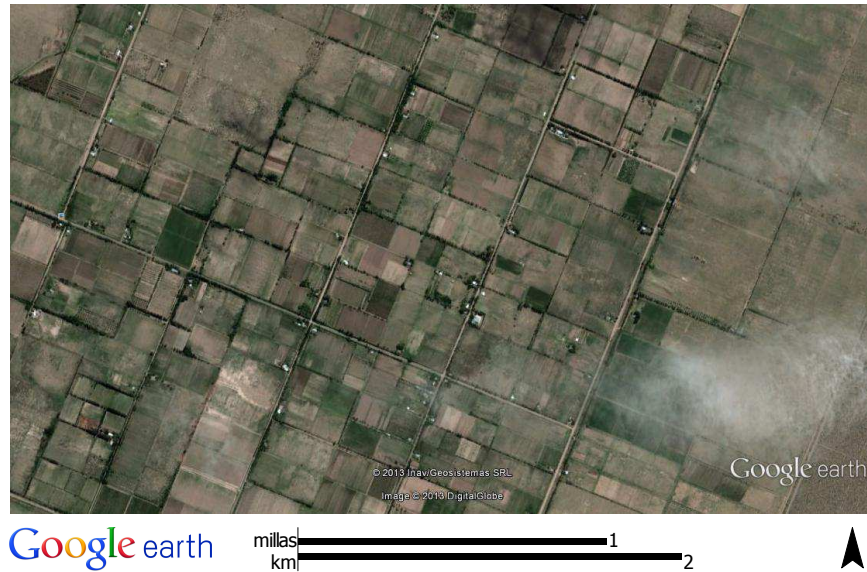


Figura 1: Foto satelital de fincas de cultivo en San Rafael, Mendoza.

eligiendo ese mismo cultivo. Dada la presencia de esta complementariedad, se observará que los productores tenderán a alinear el comportamiento con el de sus vecinos.

Dadas las características del caso a analizar, en el que se tiene agentes heterogéneos, externalidades y complementariedades estratégicas, una metodología alternativa podría consistir en la modelización del caso mediante la teoría de juegos. Sin embargo, la modelización mediante AA.CC. presenta marcadas ventajas respecto al planteo de un juego. En primer lugar, el sistema se vuelve mucho más manejable y simplificado cuando el número de agentes es alto (aquí se plantea un caso de n^2 productores o chacras heterogéneas, el cual sería inmanejable en un juego). Segundo, el modelo computacional planteado permite analizar la dinámica de transición hacia el equilibrio, cuestión que se pierde en un análisis de teoría de juegos en el que sólo se obtienen los equilibrios de Nash. Por último, otra ventaja de modelar el caso de esta manera consiste en la posibilidad de imponerle al problema una distribución espacial, que parece asemejarse de forma simplificada a la forma en la que se distribuyen las chacras en regiones productivas como las que aquí se estudian (ver Figura 1).

En la Figura 1 puede observarse la existencia de múltiples chacras de reducido tamaño. Las mismas pueden ser interpretadas de manera análoga a las celdas o células de las matrices utilizadas en la caracterización computacional de los AA.CC. Cabe destacar la diferencia espacial que se observa en un caso como el de la Figura 1, referido a Mendoza, con otra área geográfica. La Figura 2 se obtuvo con la misma escala que la utilizada para la 1, pero la foto satelital es una tomada a hectáreas de campo de la Pampa Húmeda. Las diferencias entre



Figura 2: Foto satelital de campos en General Viamonte, Buenos Aires.

ambas figuras son notables, particularmente en lo que refiere a la composición espacial de las chacras (para Mendoza) y campos (para la Pampa Húmeda). La similitud que se busca obtener entre la distribución espacial en la realidad y la modelización de los AA.CC. es marcada para el caso de Mendoza, no así para el pampeano.

El trabajo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 revisa la literatura existente sobre el tema y discute similitudes y aportes realizados por este trabajo. La sección 3 presenta el modelo. La sección 4 discute los resultados obtenidos: se muestra un caso simple tomado como benchmark, se analiza la robustez ante cambios en la definición de vecindades y la sensibilidad del modelo a cambios en los niveles de los parámetros. La sección 5 compara los resultados del modelo descentralizado presentado en la sección 3 –principalmente la aglomeración y los beneficios agregados– con un caso de maximización con planificación social modelizado mediante algoritmos genéticos. En la sección 6 se presentan posibles extensiones empíricas al modelo planteado y cuestiones sobre las cuales se puede seguir trabajando. La sección 7 concluye.

2. Revisión de Literatura

La relación entre el aprendizaje social, el crecimiento y la difusión de procesos tecnológicos ya ha sido extensamente discutida por la literatura de crecimiento endógeno (Romer (1986); Lucas (1988); Aghion y Howitt (1998); Acemoglu (2007)). Para el caso particular del sector agrícola, las nuevas tecnologías

son introducidas o bien por los propios productores que experimentan individualmente, o bien por intervenciones sectoriales formales. Luego, el proceso de aprendizaje social es el que fomenta y ayuda a que esa nueva tecnología se difunda.

En lo que sigue se mencionan y describen brevemente trabajos recientes que han tratado de modelizar y de abordar empíricamente el fenómeno de aprendizaje social y difusión de tecnologías en el sector agrícola.

Uno de los trabajos pioneros en esta literatura de información en el campo agrícola es el de Besley y Case (1994). El paper es uno de los primeros en explorar el rol del proceso de aprendizaje y difusión de información en la adopción de nuevas tecnologías en la agricultura: trata específicamente el caso de la implementación de cultivos con semillas de algodón de alto rendimiento (HYVs por sus siglas en inglés) en una aldea de India en el año 1980. El estudio desarrolla un modelo de aprendizaje dinámico, en el que cada período los agentes deciden qué porción de su tierra destinar al cultivo de nuevas semillas. Los retornos a esta decisión son analizados en dos perspectivas: beneficios económicos directos asociados al cultivo por un lado, y el aprendizaje de la nueva tecnología por el otro. El modelo permite a los autores explicar por qué determinadas tecnologías se difunden en algunas áreas geográficas y no en otras. Procesos en los que el testeado o prueba inicial de la tecnología se ve acompañado de altos rendimientos y beneficios se ven sucedidos por otros en los que la adopción de esa tecnología se difunde a gran parte de los agentes. Lo contrario ocurre si la prueba inicial da como resultado rendimientos y beneficios bajos. Según los autores, el impedimento principal en la difusión y adopción de nuevas tecnologías consiste en la baja velocidad de transmisión de la información. Además, si la información “viaja rápido” al interior de una misma área geográfica pero lento entre áreas diferentes, se podrán observar configuraciones en las que distintas tecnologías prevalecen mayoritariamente en cada área. Adelantando los resultados, en el modelo que aquí presentamos este fenómeno se caracterizará mediante diferentes valores del parámetro ϕ .

Foster y Rosenzweig (1995) analizan cómo el proceso de comunicación de la información fomenta el uso de variedades de semillas de arroz y trigo de alto rendimiento (HYVs) en el contexto de la Revolución Agrícola en India. Ese período se caracteriza por la entrada al país de nuevas tecnologías productivas, juntamente al reemplazo paulatino de antiguas tecnologías de producción agropecuaria que habían prevalecido durante décadas. Las estimaciones del modelo indican que el conocimiento imperfecto del manejo de la nueva tecnología, particularmente el uso de semillas HYVs, conforma la mayor barrera para que los productores modernicen y adopten la nueva tecnología. En cuanto el número de productores en una misma área geográfica que adoptan la nueva tecnología es mayor, esa barrera de entrada a la adopción de la misma disminuye, a la vez que aumenta la rentabilidad de la nueva tecnología. Es decir, productores en áreas con mayor experiencia en el uso de la tecnología son proclives a dedicar una mayor proporción de producción a la nueva semilla, a la vez que obtienen mayores rendimientos. Expresado en magnitudes, un incremento dado en la experiencia de uso promedio en el vecindario de cada productor aumenta la rentabilidad

dos veces más que un aumento de la misma magnitud en la experiencia de uso propia. De forma similar, en nuestro modelo la producción del entorno también afecta de forma significativa los beneficios propios. Los beneficios que obtiene cada chacra por determinado cultivo aumentan conforme aumenta el número de vecinos que cultivan la misma especie.

Munshi (2004) trabaja sobre el mismo escenario que Foster y Rosenzweig: la adopción de semillas de arroz y trigo HYVs en la Revolución Agrícola en India. El aporte de este paper consiste en analizar el proceso de difusión de información y su relación con la heterogeneidad de los agentes involucrados. Los resultados principales del trabajo se mantienen respecto a los de Foster y Rosenzweig, pero agregan que el cultivo de arroz difiere principalmente respecto al del trigo en una característica: la mayor heterogeneidad en los productores. Esta mayor heterogeneidad en el primer caso se vio correlacionada con el hecho de que los productores de arroz se muestran menos sensibles a la información provista por su entorno o vecindario, mientras que los de trigo, más homogéneos, responden de manera fuerte y rápida a experiencias de sus vecinos. Así, los productores de arroz se muestran proclives a experimentar más en tierras propias, a modo de compensar la falta de información social relativa al caso del trigo.

Para Mozambique, Bandiera y Rasul (2005) analizan la adopción y expansión del cultivo de girasol. Los autores estudian la adopción de la nueva tecnología en relación a la adopción previa de la misma por parte de familiares y amigos de cada uno de los productores. Los resultados principales que obtienen son los siguientes: (1) la relación entre la decisión individual y la de los pares presenta una forma de U invertida, es decir, los efectos sociales en la adopción son positivos cuando existen relativamente pocos productores en el vecindario que la adoptan, y negativo cuando ese número se incrementa⁴; (2) las decisiones de los granjeros que poseen mejor información sobre el cultivo de girasol son menos sensibles a la información social del entorno; (3) contrariamente a lo que algunos autores previamente mencionaron para el caso de Mozambique, el entorno o vecindario relevante es el conformado por amigos y familiares en vez de miembros que pertenecen a una misma religión. El modelo que nosotros presentamos contempla a la vecindad y a la distancia como elementos geográficos: el vecindario relevante consiste en chacras aledañas, y la distancia entre la misma será la distancia euclídea en una grilla conformada por chacras. No obstante ello, la interpretación de la distancia puede ser modificada. Si bien la interpretación del trabajo cambiaría ligeramente, el concepto de distancia que nosotros presentamos puede ser interpretado a la Bandiera y Rasul, dándole a la misma un componente más cultural e idiosincrático que geográfico.

Desde una perspectiva más empírica, Duflo Kremer y Robinson (2006) realizan un experimento aleatorio para estudiar la adopción de nuevas tecnologías en cultivos en Kenya. En realidad, lo que los autores desean explicar es por qué en

⁴La explicación de este fenómeno puede verse explicada en Bandiera y Rasul (2005). Resumidamente, esta forma surge de predominancias diferentes en cada nivel de un efecto positivo del aprendizaje social en cuanto provee mayor y mejor información, y otro negativo relacionado con la intención de incurrir en conductas free-rider al desear demorar la adopción de la tecnología para obtener aún mayor y mejor información del entorno.

ese país un porcentaje alto de productores no adoptan tecnologías nuevas que aumentan el rendimiento de los cultivos (básicamente fertilizantes), aun cuando organismos relacionados a la política agrícola los promocionan. Los resultados que ellos obtienen destacan el problema básico de la información como barrera a la entrada a nuevas tecnologías: gran parte de la baja adopción de nuevas técnicas se explica por la ausencia de información sobre las mismas y, más precisamente, por la ausencia de mecanismos de propagación de la información. Este problema, junto a problemas básicos de financiamiento característicos en los países pobres, conforma la causa más relevante del atraso tecnológico.

Por último, aunque no menos importante, Conley y Udri (2008) investigan el rol del aprendizaje social en la difusión de una nueva tecnología de cultivo en Ghana, África. Los autores analizan el cambio tecnológico que experimentó el distrito sureño de Akwapim, en el que cultivos tradicionales como el maíz y la mandioca fueron extensamente reemplazados por cultivo de ananá destinados a mercados europeos. Esa transformación tecnológica en el área implicó la adopción de nuevas técnicas e insumos. El interés principal de los autores radica en medir el rol que tienen la información y el proceso de aprendizaje social en la difusión del cultivo de ananá. La modelización del aprendizaje se da básicamente con el aprendizaje que los granjeros experimentan respecto a los insumos productivos: fertilizantes y otros productos químicos. Luego de definir precisamente el vecindario (o los agentes a partir de los cuales cada productor se informa y aprende) y de sortear diversos problemas relacionados a la identificación, los resultados que obtienen los autores son los siguientes: (1) el agente cambia de fertilizantes si observa que sus vecinos han tenido mala experiencia (cosecha menor) con el fertilizante que él mismo utilizaba previamente; (2) aumenta el uso de un fertilizante si ese producto genera beneficios altos e inesperados a sus vecinos; (3) los granjeros responden más a la información sobre productividad de los insumos si la misma proviene de productores más viejos y con riqueza similar a la del agente.

El aporte principal que realiza nuestro trabajo a los revisados anteriormente radica en la modelización que hacemos del proceso de difusión y adopción de nuevas tecnologías. Como explicamos previamente, plantearemos un modelo de AA.CC., el cual provee un marco adecuado para describir y analizar la dinámica de sistemas donde las partes actualizan su estado en función de las condiciones de su entorno. Lo que vamos a estar analizando son agentes (chacras) que utilizan información de un entorno relevante, la procesan y determinan la actualización de su estado, que en nuestro caso consiste en el cultivo a producir. Cada productor decide su cultivo a partir de la maximización de beneficios. Dicha maximización se hace contemplando diferentes dimensiones: productividades de cada cultivo, externalidades producidas y recibidas del entorno, y complementariedades estratégicas.

3. Modelo

Sean $N = n \times n$ agentes (en adelante, chacras), dispuestos en una grilla de $n \times n$. Cada chacra j se encuentra definida por un vector posición (x_j, y_j) y por un estado (S_j) , donde $(x_j, y_j) \in [\mathbb{N} \cap [1, n]] \times [\mathbb{N} \cap [1, n]]$ y $S_j \in A = \{1, 2, 3\}$. El conjunto de los estados, A , define los posibles cultivos que se pueden realizar en cada chacra. Se dice que la chacra j cultiva el cultivo 1 si $S_j = 1$.

Dada una distribución de cultivos para cada chacra, $\{S_{k,j}\}_{j \in [\mathbb{N} \cap [1, N]]}$, se define a

$$M_k = \prod_{j \in [\mathbb{N} \cap [1, N]]} S_{k,j} \quad (1)$$

como el estado k del autómata celular. Es decir, la distribución específica k de cultivos en el espacio.

3.1. Productividades

Cada chacra posee una productividad ideosincrática para producir cada tipo de cultivo. Sea $a_{i,j}$ la productividad específica de la chacra j para producir el cultivo i . La misma es una variable aleatoria tal que $a_{i,j} \sim N(\mu_i, \sigma_i)$. A lo largo de todo el trabajo, como simplificación se tomará $\mu_i = 1$ y $\sigma_i = 1$ para todo cultivo i .

3.2. Externalidades

Cada chacra produce una externalidad al resto de las chacras, y a su vez recibe otra de ellas. Con esto se busca representar de forma general un contexto de complementariedad estratégica, en el que la producción de cualquier cultivo tiene retornos crecientes a escala a nivel agregado. Es decir, cuantas más chacras producen el mismo cultivo, mayor será el beneficio para ellas. Al mismo tiempo, esta relación depende de la distancia entre las chacras: cuanto más cercanas se encuentren chacras que producen el mismo cultivo, mayor será el beneficio que obtendrán al producirlo. Ambas cuestiones tienen estrecha relación con el acceso a la información sobre nuevas tecnologías y la velocidad a la que se difunde la misma. Cuanto más fácilmente obtenible sea la información y más rápidamente se expanda (lo cual se dará ante distancias cortas), mayor será la externalidad y la complementariedad estratégica que se espera observar entre chacras cercanas.

Se define a

$$E_{S_j} = \sum_{i \neq j} \chi_{c_j}(i) e^{-\phi d_{i,j}} \quad (2)$$

como la externalidad positiva que recibe la chacra j por producir el cultivo $S_j \in A$, dados los cultivos que producen las $N-1$ chacras restantes. En (2), $c_j = \{i \neq j : S_i = S_j\}$, χ_{c_j} es una función característica que vale 1 si $i \in c_j$ y 0 en caso contrario; $d_{i,j}$ es la distancia euclídea en la grilla entre las chacras j e i , definida como $d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$. Por último, ϕ es un parámetro

que indica la sensibilidad de la externalidad a la distancia: cuanto mayor sea ϕ , menor será la importancia que el cultivo de chacras lejanas adquiere en el proceso de decisión.

3.3. Beneficios

En este modelo existen dos fuerzas que determinan los beneficios que obtendrá cada chacra al producir cada cultivo. Por un lado están las productividades ideosincráticas de cada chacra, que son aleatorias y varían por cultivo. Se pueden entender como las diferencias tecnológicas, climatológicas, orográficas y de disponibilidad de recursos que determinan qué tan productiva puede ser una chacra (y el productor que la explota) para producir cada tipo de cultivo, independientemente de lo que suceda en el resto de las $N-1$ chacras.

Por otro lado, existen complementariedades estratégicas que hacen que producir el mismo cultivo sea beneficioso para dos chacras, y que este beneficio sea mayor cuanto menor sea la distancia entre las mismas. Como hemos discutido en la Introducción, existen diversos motivos por los que se podrían dar este tipo de ventajas de aglomeración. Además, es en esta dimensión en la que se vuelve esencial el proceso de difusión de información que discutimos en las secciones 1 y 2. Si la información sobre nuevas tecnologías es fácilmente obtenible y la comunicación de la misma entre agentes es realizada a alta velocidad, las complementariedades estratégicas se observarán con mayor fuerza, y las economías de escala serán más explotadas.

Dada la externalidad E_{S_j} y la productividad asociada a cada cultivo, $(a_{i,j})$, se define el beneficio de producir el cultivo i por parte del productor j , dados los cultivos de las demás chacras, como

$$\Pi_{i,j} = \alpha a_{i,j} + \beta E_{S_j}; \quad \alpha, \beta > 0 \quad (3)$$

3.4. Decisión

El proceso de decisión de cada chacra se reduce a un proceso de maximización con elección discreta. La chacra j producirá $S_j = i_{max}$ si

$$\Pi_{i_{max},j} \geq \Pi_{i,j} \quad \forall i \in A. \quad (4)$$

3.5. Dinámica

Si bien a continuación se describirá un proceso en el que el cambio en M_t se puede entender como un sistema dinámico, es importante tener en cuenta que lo relevante del ejercicio es el estado estacionario al cual converge el sistema y no la dinámica en sí. El modelo descrito, con su simplicidad, busca captar la imagen que un observador podría ver desde la altura, en una zona donde la dinámica descrita generó una determinada distribución de cultivos en un período prolongado de tiempo. En otras palabras, lo que se busca representar en este modelo se asemeja más a una foto de una situación que ya lleva mucho tiempo y no de un video de cómo se llegó hasta ese punto.

A continuación se describe una dinámica asincrónica de actualización de las decisiones de cada chacra, similar a la del modelo de condensación descrito en Heymann, Perazzo y Zimmermann (2011). Para ello se introducirá el código en Matlab correspondiente a la implementación de dicha dinámica.

- En un primer lugar se definen valores para los parámetros del modelo: α , β , ϕ , $\{a_i\}$ y el número de chacras ($n * n$). Además se especifica el número máximo de períodos que se estudiarán del sistema.
- Luego se parte de una distribución inicial aleatoria de cultivos para cada chacra, donde cada chacra posee la misma probabilidad de producir cada cultivo.

```

1 function [M] = chacras(n)
3 %%%SEED%%
  rng('default');
5 %%%Defino variables%%
7
  t = 1;           %Tiempo.
9  max_t = 1001;   %Maxima cantidad de tiempo.
  out_t = 100;    %Cada cuanto tiempo renuevo el grafico.
11 alpha = 0.5;    %Valores de alfa y beta para calcular los
  beta = 10;      %Beneficios.
13 phi = 300;      %Sensibilidad de la ext. a la distancia.

15 %%%Productividades%%
17 a_1 = 1 + 1.*randn(n);
  a_2 = 1 + 2.*randn(n);
19 a_3 = 1 + 3.*randn(n);

21 %%%Matriz de chacras inicial%%
23 M=randi(3,n);   %Matriz de nxn con valores 1,2 y 3.

25 mapa=imagesc(M); %Mapa inicial
  axis off;

```

- En cada período a partir de $t = 1$ hasta $t = max_t$ se elige una chacra j al azar de entre las N chacras posibles.

```

1 while (t<=max_t)
3     %%%Elegir una chacra al azar%%
5     one = round(rand(1,2)*(n-1))+1;
      xx = one(1); yy = one(2);

```

- Se calculan los beneficios correspondientes a dicha chacra si la misma produjera cada tipo de cultivo, dada la distribución de cultivos del momento en las demás chacras, es decir, el vector

$$\Pi_{j,t}(M_t) = \{\Pi_{1,j,t}, \Pi_{2,j,t}, \Pi_{3,j,t}\}. \quad (5)$$

```

function [Pi] = beneficios(M, alpha, beta, a_1, a_2, a_3, phi,
    n, xx, yy)
2
3   %%Contadores%%%
4   cy=1; cx=1;
5
6   %%Sumas%%%
7   suma_1= 0;
8   suma_2= 0;
9   suma_3= 0;
10  %%Distancia
11  d=0;
12
13  while(cx <= n)
14      cy=1;
15      while(cy <= n)
16          d = sqrt((cx-xx).^2 + (cy-yy).^2);
17
18          if(M(cx,cy)==1 & d~=0)
19              suma_1 = suma_1 + exp(-d.*phi);
20          end
21          if(M(cx,cy)==2 & d~=0)
22              suma_2 = suma_2 + exp(-d.*phi);
23          end
24          if(M(cx,cy)==3 & d~=0)
25              suma_3 = suma_3 + exp(-d.*phi);
26          end
27          cy = cy+1;
28      end
29      cx = cx+1;
30  end
31
32  Pi = [alpha.*a_1(xx,yy)+beta.*suma_1 ; alpha.*a_2(xx,yy)+beta
        .*suma_2 ; alpha.*a_3(xx,yy)+beta.*suma_3];
33
34  end

```

- Dado el vector $\Pi_{j,t}(M_t)$, se elige el cultivo que otorga beneficios máximos entre los tres, y la chacra j cambia su estado a ese cultivo si es que no era ese su estado original. De esta forma se obtiene M_{t+1} .

```

35  %%Calculo beneficios para cada cultivo
36
37  Pi = beneficios(M, alpha, beta, a_1, a_2, a_3, phi, n, xx,
38  yy);
39
40  max_Pi = max(Pi);           %%Beneficio maximo

```

```

6
8
10
12
14
16
    %%Elijo cultivar el cultivo de beneficio maximo.
    if (Pi(1) == max_Pi)
        M(xx,yy) = 1;
    end
    if (Pi(2) == max_Pi)
        M(xx,yy) = 2;
    end
    if (Pi(3) == max_Pi)
        M(xx,yy) = 3;
    end

```

- Se repite este mismo proceso hasta que se llega a un número fijo de iteraciones. En cada iteración se obtiene un M_t que describe la distribución de chacras hasta el momento, es decir, el estado del autómata celular en el momento t . Lo que se observa, que se mostrará de forma detallada en la siguiente sección, es que el sistema dinámico $\{M_t\}_t$ alcanza un estado estacionario estable mucho antes de las 10000 iteraciones, para todas las configuraciones de parámetros analizadas.

4. Resultados

A continuación se presentarán los resultados con diferentes especificaciones de los parámetros α , β y ϕ . Se partirá de una especificación básica (que luego se mostrará que describe una situación intermedia), luego se analizarán casos puntuales, y por último se estudiará de forma general la sensibilidad de ciertos resultados a la variación en los parámetros.

A fin de que sean comparables, en todos los casos se partirá de la misma configuración inicial (Figura 3). Esta será una matriz de 10×10 donde cada chacra producirá un cultivo de forma aleatoria, y la probabilidad de que produzca cada cultivo es la misma. Es importante aclarar que el estado estacionario al que converge el sistema no depende de la matriz inicial de la que se parta, siempre y cuando ésta provenga de la misma distribución. Es decir, que cada celda produzca de forma equiprobable uno de los tres cultivos.

Como manera de comparar de forma cuantitativa las diferentes especificaciones se utilizarán dos medidas. La primera es el beneficio agregado, que consiste en la suma de los beneficios que cada chacra percibe en el estado estacionario (ver el código del programa que lo calcula en el Anexo). La segunda es el nivel de *aglomeración* de la matriz, lo cual se mide como el número promedio de chacras que producen el mismo cultivo y se encuentran a una distancia menor que 2 de una chacra dada (ver código del programa en el Anexo, bajo el nombre de pulverizacion.m). Como indica su nombre, la *aglomeración* es una medida de qué tanta *condensación* de cultivos se ha dado.

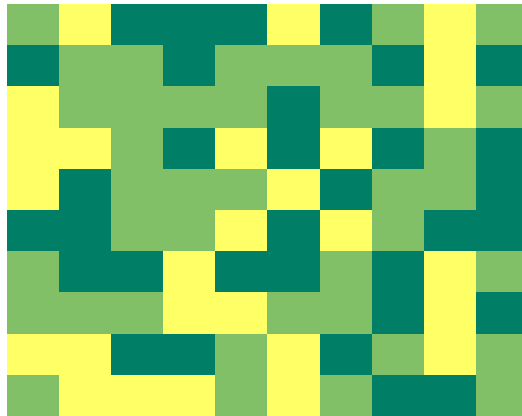


Figura 3: Matriz inicial

4.1. Especificación básica

En la especificación básica se utilizan los siguientes valores de α , β y ϕ :

α	β	ϕ
0.5	10	3

La Figura 4 muestra la distribución de cultivos luego de 500 iteraciones, es decir, M_{500} . Como se puede observar, el grado de aglomeración es ya bastante importante. Además, comparandolo con el estado estacionario al que converge (Figura 5), está claro que la distribución converge rápidamente a un estado con *condensación* en los tres cultivos.



Figura 4: Especificación básica luego de 500 iteraciones.



Figura 5: Estado estacionario de la especificación básica

Si se observa la Figura 6, donde se detalla la evolución del nivel de aglomeración a medida que evoluciona el sistema, se ve que la aglomeración crece a lo que pareciera ser una tasa exponencial hasta estabilizarse antes de las mil iteraciones, punto en el que el sistema converge a un equilibrio con un alto nivel de aglomeración.

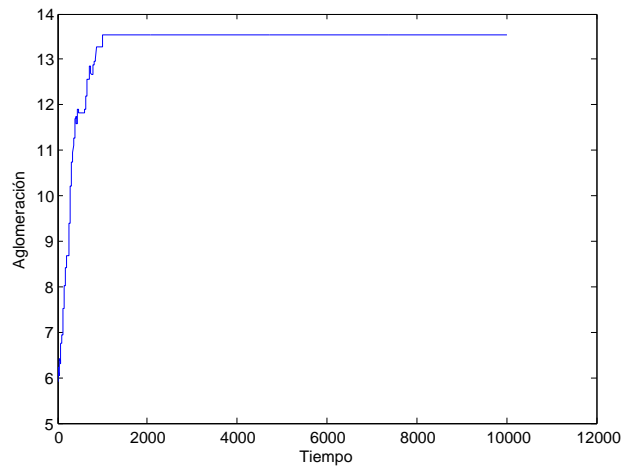


Figura 6: Evolución de la aglomeración

4.2. Especificación considerando diferentes vecindades (análisis de sensibilidad al parámetro ϕ)

Como ya se dijo, el parámetro ϕ podría entenderse como la inversa de la sensibilidad que tienen los agentes a lo que sucede a la distancia. De esta forma, podría pensarse que si este parámetro es muy bajo, entonces dos chacras muy alejadas siguen influyéndose mutuamente, mientras que si ϕ es muy alto, las chacras solamente consideran a sus vecinos más cercanos o, en el caso extremo, a ellas mismas. De esta manera, el parámetro define el tamaño de las vecindades efectivas. Sin embargo, existe una interpretación alternativa desde el punto de vista informativo. Podría considerarse que ϕ es una medida de qué tan lento viaja la información entre agentes. Si ϕ es muy alto entonces la comunicación entre chacras decrece muy rápido a medida que las mismas se alejan, mientras que si ϕ es muy bajo la información viaja de forma muy rápida entre chacras, y aun chacras muy alejadas se encuentran comunicadas.

Dadas ambas interpretaciones, lo que se esperaría encontrar con un ϕ bajo es un mayor grado de aglomeración, ya que el grado de complementariedad estratégica entre chacras aumenta. Esto se debe a que lo que cultivan todas las chacras, aun las más lejanas, afectan las decisiones de cultivo de cada chacra. Y es efectivamente esto lo que se observa con valores de ϕ por debajo de 3. En la Figura 7 se puede observar el resultado tras 500 iteraciones y en la Figura 8 el estado estacionario del modelo con las siguientes especificaciones:

α	β	ϕ
0.5	10	1

Efectivamente, como era de esperar, todas las chacras deciden cultivar el mismo cultivo, logrando así un nivel máximo de aglomeración, concentrado en un solo cultivo. Además, si se observa la Figura 9, se ve que al igual que en el caso base, el sistema converge de forma veloz a un estado estacionario de muy alta aglomeración (17).

En lo que sigue se analiza y compara el caso anterior ($\phi=1$) con las siguientes dos especificaciones: $\phi=5$ y $\phi=100$. Ambos casos tratan de modelizar situaciones en las que la comunicación entre chacras decrece de forma fuerte conforme aumenta la distancia entre las mismas. En estos casos, cada agente o chacra considerará solamente a sus vecinos más cercanos o, en el caso extremo, a ella misma, esperando encontrar estados estacionarios con niveles de aglomeración menores.

En la Figura 10 y la 11 se observa, respectivamente, el resultado tras 500 iteraciones y el estado estacionario del modelo con la siguiente especificación paramétrica:

α	β	ϕ
0.5	10	5

Si se compara con la especificación inicial de $\phi=1$, con $\phi=5$ se observa que el grado de aglomeración que resulta tras 500 iteraciones es muchísimo más bajo.



Figura 7: Especificación con ϕ bajo tras 500 iteraciones.

Lo mismo ocurre en el estado estacionario. La Figura 12 muestra la evolución de la aglomeración ante $\phi=5$. Comparativamente al caso con $\phi=3$, la aglomeración en este nuevo escenario converge de forma no monotónica, y lo hace a un estado estacionario que muestra un nivel menor (aprox. 6.5). La velocidad de convergencia no parece mostrar significativa diferencia entre ambos casos.

Por último, las Figuras 13, 14 y 15 representan el caso extremo con un $\phi=100$. A no ser por el hecho de que la evolución de la aglomeración muestra un estado estacionario de nivel menor (aprox. 6,2), la caracterización de $\phi=100$ no presenta marcadas diferencias respecto a la de $\phi=5$.

Recapitulando, en la especificación básica se mostró la configuración paramétrica con $\phi=3$. Luego, analizamos la sensibilidad del modelo a cambios en el valor del parámetro ϕ . Como se adelantó, la especificación básica representa un caso intermedio o pivotal. Especificaciones con un ϕ menor a éste se caracterizan por presentar niveles de aglomeración muy altos, dada la mayor influencia que existe entre chacras lejanas o la mayor velocidad de transmisión de información entre ellas. Dicho de otra manera, con ϕ menores a 3, la vecindad se expande, se agranda.

Lo inverso ocurre ante valores de ϕ mayores a 3. En ese caso, se observan chacras muy aisladas, entre las cuales la información no logra obtener el proceso de difusión tal para generar situaciones de alta aglomeración. En este caso, se dirá que el tamaño efectivo de la vecindad se reduce.

Cabe mencionar, por último, que a la hora de definir el tamaño efectivo de las vecindades $\phi = 3$ se presenta como un valor de quiebre. Valores menores se caracterizan por niveles de aglomeración mayor, y valores mayores de ϕ con aglomeración menor. La conducta del modelo se mantiene estable ante valores de ϕ mayores a 3, lo cual se observa con la similitud entre las configuraciones con $\phi=5$ y $\phi=100$.



Figura 8: Estado estacionario con ϕ bajo.

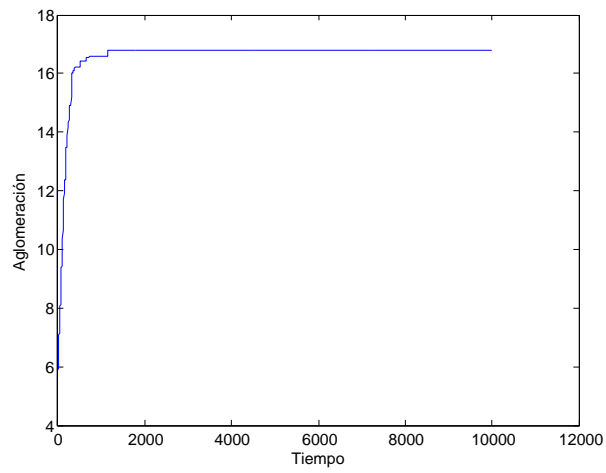


Figura 9: Evolución de la aglomeración cuando ϕ es muy bajo.

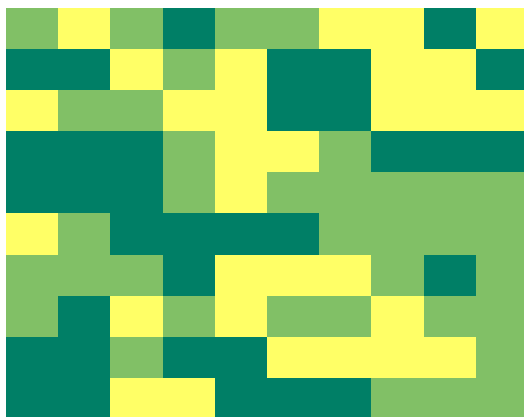


Figura 10: Especificación con ϕ de 5 tras 500 iteraciones.

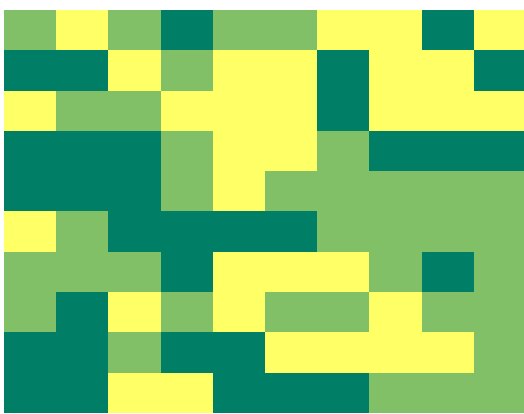


Figura 11: Estado estacionario con ϕ de 5.

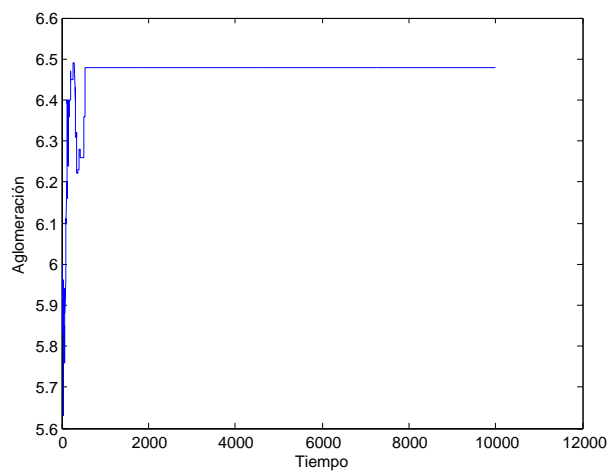


Figura 12: Evolución de la aglomeración con ϕ igual a 5.

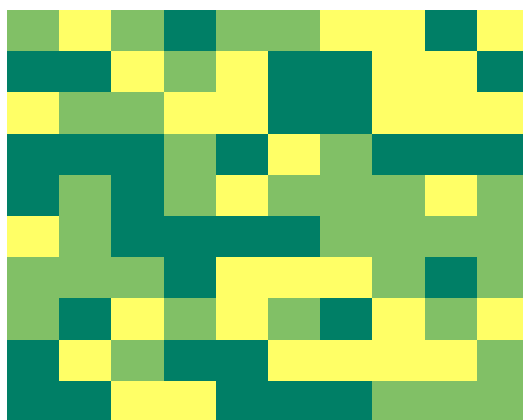


Figura 13: Especificación con ϕ de 100 tras 500 iteraciones.

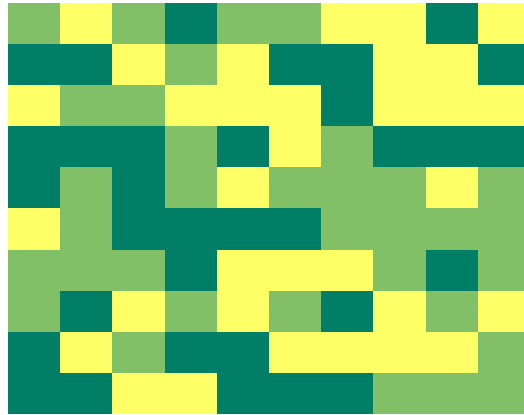


Figura 14: Estado estacionario con ϕ de 100.

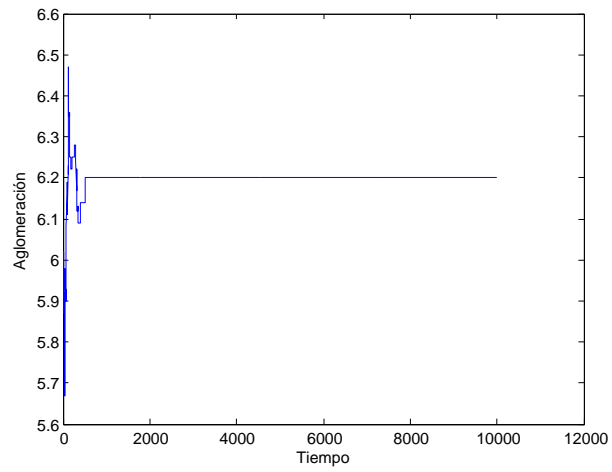


Figura 15: Evolución de la aglomeración con ϕ igual a 100.

4.3. Análisis de sensibilidad a otros parámetros

En la sección anterior se mostraron diferentes especificaciones del modelo tomando en consideración diferentes valores del parámetro ϕ . La presente sección completa el análisis de sensibilidad del modelo, teniendo en cuenta ahora también a α y β . Lo que se analiza aquí es la aglomeración que obtiene el modelo, medida sobre el estado final de cada configuración, y en función de diferentes valores de los siguientes tres parámetros, por separado: α , β y ϕ . El análisis de cada parámetro se hace *caeteris paribus* los otros dos, fijando a éstos en sus valores respectivos a la configuración básica que se mostró en la sección anterior. El código de los programas utilizados para evaluar la aglomeración a distintos valores cada parámetro se encuentra en el Anexo.

En la Figura 16 se puede ver la aglomeración en función de distintos valores de ϕ , *caeteris paribus* α y β . De ver el gráfico, se observa el mismo patrón que previamente se ha destacado: valores de ϕ entre 2 y 6 (lo hemos analizado en la sección anterior como $\phi=3$) resultan pivotaes en lo que respecta a la aglomeración: valores de ϕ menores a 2 arrojan un alto nivel de aglomeración, mientras que para los mayores a 6 ocurre lo inverso. El comportamiento de la aglomeración para valores de $\phi > 6$ no presenta cambios relevantes, independientemente del valor puntual del parámetro. Lo que agrega este gráfico respecto a lo discutido en la sección anterior es un análisis más integral, continuo y extenso de la respuesta del modelo a ϕ (previamente sólo analizamos 4 valores diferentes del parámetro). La explicación intuitiva del por qué el modelo se comporta de esta manera ante distintos valores de este parámetro es la que se presentó en la sección pasada.

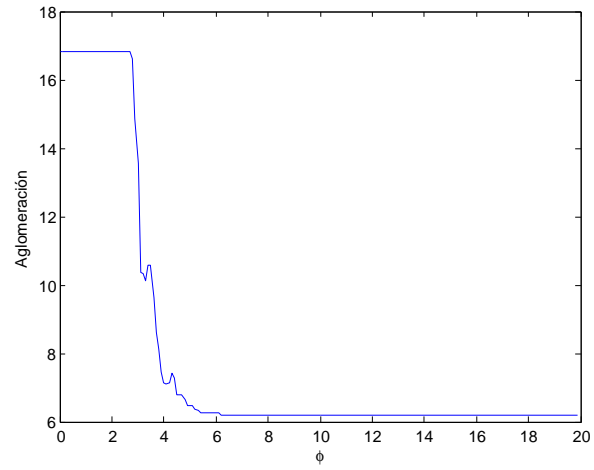


Figura 16: Aglomeración para diferentes valores de ϕ .

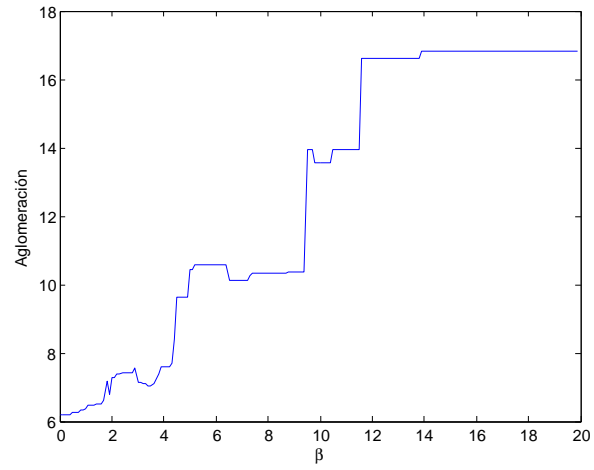


Figura 17: Aglomeración para diferentes valores de β .

En la figura 17 podemos ver que la aglomeración crece en función del parámetro β , *caeteris paribus* α y ϕ . Cabe recordar de la ecuación (3) que β indica la sensibilidad de los beneficios a la externalidad E_{S_j} , definida en (2). Así, un aumento del parámetro β representa una mayor respuesta o relación entre externalidades y beneficios individuales, lo cual se corresponde a grados de aglomeración mayores: a mayor peso de la externalidad en los beneficios, todas las chacras terminan produciendo lo mismo como respuesta a la maximización de beneficios⁵. Dicho sea de otro modo, un aumento del parámetro β puede ser en cierta forma análogo a una disminución en ϕ , lo cual se analizó como un aumento de la vecindad efectiva (ver sección anterior).

Las diferencias relevantes entre un caso en que aumenta β respecto a otro en que disminuye ϕ son dos: primero, la aglomeración aumenta con β de manera escalonada, cuando el aumento causado por una disminución de ϕ es más suave, o tiene sólo un gran escalón. La segunda diferencia es que, de forma contraria a una variación en ϕ , el cambio de β afecta a todas las chacras por igual, independientemente de la distancia que exista entre chacras con igual o distinto cultivo. Y puede ser esta diferencia la que origina el hecho de que la aglomeración aumente de forma escalonada con β . El hecho de que una disminución de ϕ tenga relación con la distancia permite que la aglomeración cambie de forma suave, dado que los cambios de estado entre las chacras se dan de forma paulatina. El parámetro β , en cambio, afecta a todas por igual. Así, parecieran existir distintos niveles de este parámetro que funcionan como *thresholds* para la aglomeración. Las chacras van cambiando su estado no paulatina, sino conjunta pero interrumpidamente conforme aumenta el peso de la externalidad en los beneficios.

⁵Recordar, por definición en (2), que la externalidad sólo opera ante producción de un mismo cultivo. Ello fue expresado mediante la función característica χ_{c_j} .

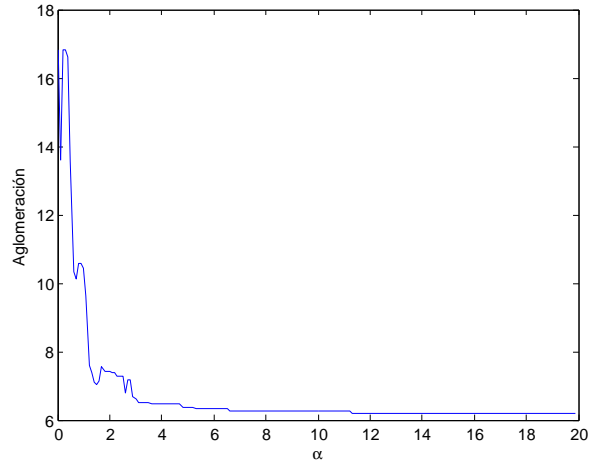


Figura 18: Aglomeración para diferentes valores de α .

Por último, en la figura 18 se pudo observar cómo varía la aglomeración cuando varía α , *caeteris paribus* β y ϕ . Un aumento del parámetro α indica una mayor respuesta o relación entre productividades y beneficios individuales (ecuación (3)). En este caso, un aumento del parámetro en cuestión resulta análogo a un aumento en ϕ . Cuanto más pesa la productividad individual relativa a la externalidad o a la vecindad relevante en la maximización de beneficios, más individualista será la decisión que tome cada chacra respecto al cultivo a producir. La aglomeración decrece así con α .

5. Decisión centralizada vs equilibrio descentralizado

Otro ejercicio relevante consiste en analizar las diferencias que surgirían entre un fenómeno emergente, en el cual cada chacra decide qué cultivo producir de forma individual recibiendo estímulos del ambiente, y una situación en la que un planificador central decide la distribución de cultivos entre chacras a fin de maximizar el beneficio agregado.

Con este objetivo, se presenta a continuación un algoritmo genético que pretende encontrar la distribución de cultivos en la grilla que maximice el beneficio agregado, entendido como la suma de los beneficios de cada chacra.

5.1. Planificador central con algoritmo genético

El algoritmo genético utilizado se basa en el presentado por Heymann, Pezazzo y Zimmermann (2011), modificado para el caso en cuestión. En primer lugar, se parte de un genoma aleatorio de k cromosomas, donde cada cromoso-

ma constituye un vector en el que cada elemento puede tomar los valores 1, 2 o 3. Estos vectores de tamaño $(n * n)$ constituyen diferentes estados posibles (M_s) del autómata celular.

```

1 function genome = ga_ternary_new(k,m)
    genome.chromos = randi(3,k,m);
3    genome.fitness = zeros(k,1);
end

```

Al igual que en el algoritmo original, la evolución del genoma se llevará a cabo con dos operaciones: mutación (fuente de variabilidad en la reproducción asexual) y cruce. La cruce se mantiene idéntica al algoritmo original, combinando dos vectores, donde el punto de corte de cada uno es elegido de forma aleatoria. En la mutación se modifica ligeramente el programa debido a que el sistema de representación aquí es ternario, por lo que ahora la posición elegida para mutar puede cambiar a cualquiera de los otros dos posibles estados (cultivos) de forma equiprobable.

```

%Operador cruza: corte y union
2 function chromo = chromo_cross(chromo1, chromo2)
    len = length(chromo1);
4    cutx = randint(1,1,[1 len]);
    chromo = [chromo1(1:cutx) chromo2(cutx+1 : len)];
6    end

```

```

%Operador de mutacion: cambia un bit
2 function chromo = chromo_mutate(chromo1)
    len = length(chromo1);
4    x = randint(1,1,[1 len]); %Elije un valor al azar
    chromo = chromo1;
6    %Si el valor elejido es igual a 1, con probabilidad 0.5 lo
    convierte en 2
    %y con probabilidad 0.5 lo convierte en 3.
8    if(chromo(x)==1)
        p=rand(1);
10    if(p>=0.5)
            chromo(x) = 2;
12    else
            chromo(x) = 3;
14    end
    end
16    %Si el valor elejido es igual a 2, con probabilidad 0.5 lo
    convierte en 1
    %y con probabilidad 0.5 lo convierte en 3.
18    if(chromo(x)==2)
        p=rand(1);
20    if(p>=0.5)
            chromo(x) = 1;
22    else
            chromo(x) = 3;
24    end
end

```

```

    end
26 %Si el valor elegido es igual a 3, con probabilidad 0.5 lo
    convierte en 1
    %y con probabilidad 0.5 lo convierte en 3.
28     if(chromo(x)==3)
        p=rand(1);
30         if(p>=0.5)
            chromo(x) = 1;
32         else
            chromo(x) = 2;
34         end
    end
36 end

```

Donde realmente existe una diferencia con el algoritmo original es en la definición del éxito reproductivo (*fitness*). El mismo se define como el nivel de beneficio agregado que representa cada cromosoma. Para ello se transforma el vector de ($n*n$) en una matriz de $n \times n$ y se evalúa el beneficio agregado como la suma de los beneficios de cada chacra.

```

1  function beneficio_social = fitness(genome, a_1, a_2, a_3,
    alpha, beta, phi, n)
    for i=1: length(genome.fitness),
3     chro = genome.chromos(i, :);
5     %Transformo el cromosoma de vector a matriz%%
    M = vec2mat(chro, n);
7
9     %Defino suma de beneficios%%
    suma = 0;
11    %Inicializo contadores%%
    c=1;
    r=1;
13
15    %Aoopeo sobre c y r%%
17    while(c<= n)
        r=1;
19        while(r<=n)
            Pi = beneficios(M,alpha, beta, a_1, a_2, a_3,
                phi, n, r, c);
            suma = suma + Pi(M(r,c));
21            r= r+1;
        end
23        c= c+1;
    end
25    genome.fitness(i,1) = suma;
27 end
29 beneficio_social = genome.fitness;
end

```

Se definen estas funciones y la función que realiza la evolución propiamente dicha, que se mantiene igual a la del algoritmo en el que se basa este programa (ver Anexo). Luego se implementa el programa que realiza la optimización propiamente dicha. En el mismo se parte del genoma aleatorio inicial ya especificado, se realiza la evolución por medio de una mutación, cruza y unión, y luego se ordenan los cromosomas de acuerdo al *fitness*. Cuando el cromosoma con mayor beneficio agregado es el mismo durante 50 iteraciones seguidas, se considera que este es el óptimo.

```

1 function [PO]= chacrasgeneticas(n, k)
3 rng('default');
5 alpha = 0.5;      %Valores de alfa y beta para calcular los
beta = 10;         %beneficios.
7 phi = 3;         %Sensibilidad de la ext. a la distancia.
9 %Productividades%%%
11 a_1 = 1 + 1.*randn(n);
a_2 = 1 + 1.*randn(n);
13 a_3 = 1 + 1.*randn(n);
15 genome = ga_ternary_new(k,n*n);
17 genome.fitness = fitness(genome, a_1, a_2, a_3, alpha, beta, phi, n
);
19 iter = 0; same = 0; best = 0;
21 while ( same <50)
genome.chromos = ga_evolve(genome, k);
23 genome.fitness = fitness(genome, a_1, a_2, a_3, alpha, beta,
phi, n);
if genome.fitness(1) > best,
25     same = 0;
best = genome.fitness(1);
27 end
if genome.fitness(1)== best,
29     same = same+1;
end
31 iter= iter + 1;
end
33 %imprimir el número de iteraciones que llevó
iter
35 %Graficar la solución
37 PO = vec2mat(genome.chromos(1, :),n);
colormap(summer);
39 mapa=imagesc(PO);
axis off;

```



Figura 19: Solución centralizada con algoritmo genético y genotipos de 10 cromosomas.

5.2. Solución del planificador central

Para poder comparar con el caso de las chacras funcionando como autómatas celulares se implementó el algoritmo genético para los valores *benchmark* de los parámetros, es decir, con $\phi = 3$, $\alpha = 0,5$ y $\beta = 10$. Además las distribuciones de productividad entre las chacras son las mismas.

En la Figura 19 se puede observar la solución que arroja el algoritmo genético descrito con genomas de 10 cromosomas⁶ luego de 1272 iteraciones. Como se puede observar, la aglomeración en el caso centralizado es menor que en la solución descentralizada por autómatas celulares, aunque definitivamente bastante alta.

Por otro lado, lo que sorprende es que el valor de los beneficios agregados en el caso de la solución centralizada es de 258,9848; mientras que con autómatas celulares se alcanzaba un valor de beneficio agregado mayor, igual a 275,8182. Además, la Figura 19 se asemeja más al estado tras 500 iteraciones (Figura 4) que al estado estacionario del autómata celular. Esto pareciera indicar que el resultado que se obtiene de una situación en donde cada chacra maximiza su beneficio individual es Pareto superior al resultado que se obtiene cuando se implementa un algoritmo medianamente complejo que intenta optimizar de forma directa el beneficio agregado. Si bien claramente esta diferencia puede atribuirse a que el algoritmo genético no es lo suficientemente eficiente o no explora de la mejor manera el universo de estados posibles, no debe pasarse por alto el mérito del autómata celular, que sin buscarlo de forma directa consigue optimizar un problema complejo de manera superior al de un algoritmo diseñado con dicho propósito.

⁶Se probaron con todas las especificaciones entre 5 y 80 cromosomas. Se eligió el caso con 10 cromosomas porque es el que arroja el mayor beneficio agregado de entre todas esas especificaciones.

6. Posibles extensiones y futuro trabajo

En la presente sección se discuten diferentes cuestiones sobre las que se puede continuar trabajando.

La primera y más obvia consiste en un análisis empírico del modelo que se presentó. La parte fundamental de cualquier análisis de este tipo consiste en la disponibilidad de (buena) información. En primera instancia, se debe contar con una buena base de datos. La misma podría provenir tanto de alguna encuesta correcta y completamente planteada sobre cultivos de las chacras, o también de datos provistos por algún organismo relacionado con la actividad agropecuaria. En caso de contar con alguna encuesta, se deberá analizar la confiabilidad de sus datos en función de la aleatoriedad con la que fueron obtenidos y del proceso de selección muestral.

Lo ideal sería poder encontrar alguna relación causal entre la decisión de cultivo de una chacra en función de lo que está cultivando su vecindad relevante. Para ello, se describen a continuación las variables mínimas con las que se debería contar. Se debería considerar datos geográficos y sobre la cosecha de cultivos: aquí se debería contener data sobre el rendimiento de cada tierra, los cultivos que se producen, el *timing* de las cosechas, características orográficas de la tierra, etc. Los inputs y outputs por cultivo son también variables fundamentales. Mediante los inputs se puede llegar a medir el proceso de aprendizaje y de difusión de información, mientras que con los outputs se puede obtener una buena medida de los beneficios de los productores. Contar con variables económicas a nivel más macro o coyuntural sería de gran importancia, dado que son controles indispensables en cualquier regresión del tipo a la que se correría en un caso como este.

Las variables relativas a la vecindad o entorno social resultan también fundamentales para realizar un análisis empírico que valide el modelo. Para esto también se puede obtener una base de datos en la que se incluya entorno relevante de cada agente, la información que poseen, cómo se la comunican, si esa comunicación se da dentro de entornos sociales bien definidos como raza, religión, familia, amistad. Conley y Udri (2008) y Bandiera y Rasul (2006), por ejemplo, construyen una base de datos que contiene información sobre con quién habla cada granjero, el contenido informativo de la entrevista (qué consejos sobre fertilizantes o insumos dan), y las características socio-culturales de los individuos involucrados.

Otro conjunto informativo relevante serían las características observables de cada granjero en cada chacra. Aquí se podrían incluir medidas de experiencia con cada cultivo (cantidad de veces que lo cosechó, por ejemplo), medidas de riqueza y capital físico de cada granjero, su capital financiero y sus posibilidades de acceso al mercado crediticio.

Algún dato que permita *matchear* todas las variables con la formación de cooperativas sería también un gran aporte al trabajo.

En lo que respecta al modelo, una posible extensión que puede resultar atractiva para el análisis consiste en definir otro tipo de heterogeneidad entre agentes captada por el parámetro ϕ , a la Munshi (2004). Esta extensión contemplaría

casos en los cuales las vecindades relevantes variarían en función del cultivo que cada chacra esté produciendo. El impacto de la distancia no sería así homogéneo para todos los cultivos. Con esta extensión se permitiría ver si existen cultivos más propensos a contar con procesos de aglomeración que otros. En caso de obtener resultados en línea con ello, sería ideal también poder analizar el tipo de características que determinan que ese cultivo sea más afín a aglomerarse.

Por último, el modelo se enriquecería con alguna extensión o complejización que permita analizar cuándo y bajo qué circunstancias es que se forman las cooperativas, que fue la motivación inicial del trabajo. Por cuestiones de simplificación y alcance, la formación de las mismas se supuso automática ante niveles de aglomeración altos. Modelizar esta conducta será otra de las cosas sobre las cuales se seguirá trabajando.

Así, se tiene un trabajo que presenta intuiciones y una modelización interesante que permite dar cuenta de los fenómenos primordiales que pueden subyacer a realidades en las que se observan zonas geográficas con niveles de homogeneidad en los cultivos remarcables. No obstante, esta sección remarca que mucho puede hacerse en pos de mejorar aún más el planteo, enriqueciendo el modelo teóricamente y robusteciéndolo con algún correlato empírico que lo avale.

7. Conclusión

El trabajo presentó un marco analítico adecuado para analizar procesos de innovación en la agricultura caracterizados por la difusión y adopción en forma conjunta de un mismo cultivo en una misma área geográfica. Este componente esencial fue representado a lo largo del trabajo con el concepto de aglomeración, modelizado mediante Autómatas Celulares. La adopción de nuevas tecnologías (cultivos en este caso) tuvo estrecha relación con la disponibilidad de información, y con la difusión de la misma dentro del entorno relevante para cada agente.

Se observó que cuando la vecindad efectiva de cada chacra aumenta, o, alternativamente, cuando la velocidad de transmisión de información entre chacras aumenta, la aglomeración también lo hace. Se termina en casos en los que la gran mayoría de agentes deciden implementar la misma tecnología o cultivo. Lo mismo ocurre cuando el peso de la externalidad en los beneficios individuales aumenta, y cuando el peso de la productividad propia en los beneficios disminuye. Con estos resultados se logró captar de manera correcta un proceso decisorio en el cual las externalidades y complementariedades estratégicas prevalecientes en el entorno son de suma importancia en el proceso de optimización de beneficios de cada agente. La transmisión de información funciona como un detonante importante de dichas externalidades y complementariedades.

En términos de los beneficios sociales o agregados, se mostró, para el modelo aquí presentado, que un proceso decisorio basado en la maximización de beneficios individuales arroja mejores resultados que otro planificado. Se destacó aquí el mérito del autómata celular, que sin buscarlo de forma directa con-

siguió optimizar un problema complejo de manera superior al de un algoritmo diseñado específicamente con dicho propósito.

Se presentó entonces un modelo que dio cuenta de uno de los posibles factores que pueden subyacer al proceso de extensión y difusión de una misma tecnología agrícola en una misma área geográfica. Los resultados que se obtuvieron resultan coherentes con los hechos estilizados que se esperaban obtener en base a las observaciones de casos reales. Si bien, como se destacó en la sección anterior, es mucho el trabajo que aún se puede hacer, el aquí expuesto puede considerarse un buen punto de partida.

Referencias

- [1] D. Acemoglu. *Introduction to modern economic growth*. Princeton University Press, 2008.
- [2] P. Aghion and P. Howitt. *Endogenous growth theory*. MIT press, 1997.
- [3] O. Bandiera and I. Rasul. Social networks and technology adoption in northern mozambique*. *The Economic Journal*, 116(514):869–902, 2006.
- [4] T. Besley and A. Case. Diffusion as a learning process: Evidence from hvv cotton. *Princeton University, Woodrow Wilson School of Public and International Affairs, Research Program in Development Studies. Working Papers*, 1994.
- [5] T.G. Conley and C.R. Udry. Learning about a new technology: Pineapple in ghana. *The American Economic Review*, 100(1):35–69, 2010.
- [6] E. Duflo, M. Kremer, and J. Robinson. Understanding technology adoption: Fertilizer in western kenya, preliminary results from field experiments. *Unpublished manuscript, Massachusetts Institute of Technology*, 2004.
- [7] A.D. Foster and M.R. Rosenzweig. Learning by doing and learning from others: Human capital and technical change in agriculture. *Journal of political Economy*, pages 1176–1209, 1995.
- [8] D. Heymann, R. Perazzo, and M. Zimmermann. Modelos económicos de múltiples agentes. una aproximación a la economía desde los sistemas complejos. *Trabajo en preparación*, 2011.
- [9] R.E. Lucas. On the mechanics of economic development. *Journal of monetary economics*, 22(1):3–42, 1988.
- [10] K. Munshi. Social learning in a heterogeneous population: technology diffusion in the indian green revolution. *Journal of Development Economics*, 73(1):185–213, 2004.
- [11] P.M. Romer. Increasing returns and long-run growth. *The Journal of Political Economy*, pages 1002–1037, 1986.

A. Beneficio Agregado

Dada una matriz de distribución de cultivos (M), matrices de distribución de las productividades (a_i) y parámetros α , β y ϕ se calcula el beneficio agregado como la suma de los beneficios de cada celda como se muestra a continuación.

```
2      %%Defino suma de beneficios %%
3      suma = 0;
4      %%Inicializo contadores %%
5      c=1;
6      r=1;
7
8      %%Loopeo sobre c y r %%
9
10     while (c<= n)
11         r=1;
12         while (r<=n)
13             Pi = beneficios(M,alpha , beta , a_1 , a_2 , a_3 ,
14                 phi , n , r , c);
15             suma = suma + Pi(M(r,c));
16             r= r+1;
17         end
18         c= c+1;
19     end
20     beneficio_social = suma
```

B. Aglomeración

En el siguiente programa se calcula la aglomeración como número promedio de chacras en una vecindad de radio dos que cultivan el mismo cultivo que una chacra dada.

```
function [pul] = pulverizacion(M)
2
3 %%extraigo el numero de filas y columnas de la matriz M
4 [n, y] = size(M);
5
6 %%inicializo los contadores de columna
7 c1=1;
8 c2=0;
9
10 %%inicializo lo contadores de fila
11 r1=1;
12 r2=0;
13
14 %%inicializo la suma de casilleros en la vecindad que cultivan lo
15     mismo que
16 %%un cultivo dado
17 suma=0;
18
19 %%loopeo sobre las columnas y luego sobre las filas
20 while (c1<=n)
```

```

20 r1=1;
22 while(r1<=n)
    c2=-2;

24     %en cada chacra (c1,r1) exploro la vecindad (dos casilleros
        para
        %cada lado)

26     while(c2<3)
28         r2=-2;
30         while(r2<3)

32             %me aseguro que la celda no toma valores negativos
                o por
                %fuera de la matriz
34             if( c1+c2 >0 && r1+r2>0 && c1+c2 < n && r1+r2 < n)

36                 %si el cultivo de la chacra analizada en la
                    vecindad es
                    %el mismo que el de la chacra de (c1 , r1), sumo
                    uno a
                    %suma.
38                 if(M(c1 , r1) == M(c1+c2 , r1+r2))
40                     suma= suma+1;
42                     end
44                     end
46                     r2=r2+1;
48                     end
50                     c2=c2+1;
52                     r1=r1+1;
54                     end
                    c1=c1+1;
                    end

    %calculo el promedio dividiendo suma por el numero de chacras
    pul =suma/(n*n);

end

```

C. Sensibilidad a los parámetros

Para realizar los gráficos de sensibilidad de los parámetros α , β y ϕ se implementó un programa para cada parámetro que variaba el parámetro analizado desde 0 a 20, evaluando en cada caso el nivel de aglomeración de la matriz producida por la especificación básica del programa *chacras* modificado para admitir como *input* el valor de los parámetros analizados. De esta forma, el programa implementa cuatro funciones de manera secuencial: la función principal que define los parámetros y empieza el *loop* principal, la función que recibe los parámetros como *inputs* y calcula el resultado de *chacras.m* luego de 2000 iteraciones del AA.CC. y en el último nivel la función que calcula el nivel de

aglomeración de la matriz final generada por chacras.m. El programa que realiza las últimas tres funciones es chacraspruebas.m y no se transcribe en el presente trabajo porque resulta de unificar funciones ya transcriptas y por lo tanto no aporta ninguna información adicional. Las funciones que generan efectivamente las figuras 16, 17 y 18 se presentan a continuación.

```

1 function [] = phiprueba()
2
3 alpha = 0.5;
4 beta = 10;
5 phi = 0;
6 c=0;
7 A=[];
8 while( phi <= 20)
9     c=c+1;
10    A(c)= chacraspruebas(alpha ,beta , phi);
11    phi = phi + 0.1;
12 end
13
14 X=[0:0.1:19.9];
15 plot(X,A)
16
17 end

```

```

1 function [] = betaprueba()
2
3 alpha = 0.5;
4 beta = 0;
5 phi = 3;
6 c=0;
7 A=[];
8 while( beta <= 20)
9     c=c+1;
10    A(c)= chacraspruebas(alpha ,beta , phi);
11    beta = beta + 0.1;
12 end
13
14 X=[0:0.1:19.9];
15 plot(X,A)
16
17 end

```

```

1 function [] = alphaprueba()
2
3 alpha = 0;
4 beta = 10;
5 phi = 3;
6 c=0;
7 A=[];
8 while( alpha <= 20)
9     c=c+1;
10    A(c)= chacraspruebas(alpha ,beta , phi);

```

```

11     alpha = alpha + 0.1;
12 end
13
14 X=[0:0.1:19.9];
15 plot(X,A)
16
17 end

```

D. Evolución del algoritmo genético

A continuación se presenta la función que realiza la evolución del algoritmo genético. La misma es idéntica a la de Heymann, Perazzo y Zimmermann (2011).

```

1 function new_chromos = ga_evolve(genome, k)
2 %ordena la nueva lista de cromosomas por aptitud decreciente
3 [ s , indx ] = sort (genome.fitness , 'descend');
4 chromos1 = genome.chromos;
5 new_chromos = genome.chromos( indx , : );
6 len = k;
7
8 %selecciona dos cromosomas al azar para cruzar y reemplazar el
9 %segundo peor cromosoma
10 ii = randint(1 , 2 , [1 len]);
11 if (ii(1) ~= ii(2))
12     ccross = chromo_cross(chromos1(ii(1) , :) , chromos1 (ii(2) ,
13 : ) );
14     new_chromos (len-1, :) = ccross;
15 end
16
17 %selecciona un cromosoma al azar para mutarlo , excepto el primero
18 %y reemplaza al peor cromosoma
19 i1 = randint(1 , 1 , [2 len]);
20 cmut = chromo_mutate(chromos1(i1 , : ));
21 new_chromos (len , :) = cmut ;
22 end

```