

UNIVERSIDAD DE BURGOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**INNOVACIÓN, DIFERENCIACIÓN Y FENÓMENOS DE
AGLOMERACIÓN: UN MODELO EVOLUCIONISTA**

TESIS DOCTORAL

José Ignacio Santos Martín

Directores de Tesis

Dr. Ricardo del Olmo Martínez

Dr. Javier Pajares Gutiérrez

Burgos, 2007

Agradecimientos

No afirmo nada nuevo si digo que el trabajo de una tesis doctoral es arduo, complejo e incierto, en el que uno tiene que poner siempre lo mejor de sí mismo. Es decir, que uno hace todo lo que puede y sabe para conseguir un objetivo, al principio vago, después algo más preciso y al final insultantemente claro. Echando una mirada atrás, tengo que reconocer que en esta difícil tarea no he estado solo, he sabido y podido aprovechar el conocimiento, la experiencia y la simpatía de muchas personas que de una forma u otra me han ido acompañando. A todas ellas quiero manifestarles mi agradecimiento más sincero y sentido.

A todos mis compañeros del Área de Organización de Empresas por su acogida y compañía desde el primer día que llegué a la Universidad de Burgos.

Al grupo INSISOC, y especialmente al Dr. Cesáreo Hernández, por invitarme a colaborar en su proyecto y ser uno más en su grupo.

Al Dr. Javier Pajares por ayudarme a descubrir mi vocación docente e investigadora. Al Dr. Ricardo del Olmo por su confianza y su apoyo. A ambos, por su paciencia y conocimiento al dirigir esta tesis.

Al Dr. José Manuel Galán quien no deja de sorprenderme por su inmensa capacidad de trabajo y su inagotable curiosidad científica.

A Francisco Javier Santos porque nunca dice no y siempre está dispuesto a ayudarme.

A mis padres por enseñarme lo más importante, saber vivir.

A Raquel, Isabel y Guillermo por todo y más.

Resumen

Formalizamos una aproximación teórica a los fenómenos de aglomeración y concentración industrial mediante el Modelado Basado en Agentes. La tesis principal es que la dinámica económica-espacial de muchas industrias puede explicarse desde principios evolucionistas, teniendo en cuenta la variedad de comportamientos de las empresas, los procesos de selección del mercado y los procesos de desarrollo mediante las innovaciones que las empresas llevan a cabo.

Proponemos un modelo de una industria caracterizada por una variedad de empresas –diferentes en capacidades, conocimiento y rutinas– que venden en un mercado de competencia monopolística –donde los consumidores distinguen imperfectamente entre las distintas variedades de productos– y además innovan para obtener ventajas competitivas y desarrollar nuevas variedades –el crecimiento de las empresas no sólo requiere de mejoras en los procesos y los productos sino también diversificación en nuevos productos–. Las innovaciones se ven condicionadas por las externalidades de conocimiento entre las diferentes divisiones productivas de una empresa y los knowledge spillovers localizados en la región.

Demostramos también que la simulación y el Modelado Basado en Agentes constituyen una metodología idónea para este tipo de problemas complejos, que no pierde capacidad descriptiva ni rigurosidad en las formalizaciones propuestas, aunque éstas sean computacionales y no analíticas, y además facilita el diálogo interdisciplinario entre áreas científicas heterogéneas.

Palabras clave: Economía Evolucionista, Geografía Económica, concentración industrial, innovación, knowledge spillovers, modelado basado en agentes.

Summary

We formalize a theoretical approach to industrial agglomeration and concentration phenomena using Agent-Based Modeling. The main thesis is that spatial economic dynamics of many industries can be explained from evolutionary principles, taking into account the variety of firm behaviors, selection processes in the market and development processes through firm innovations.

We propose a model of an industry where a variety of firms –they have different capacities, knowledge and routines– sell in a monopolistic-competition market –consumers distinguish imperfectly between product variants– and innovate to take economic advantage and develop new products –growth not only requires improvements in processes and products, but also diversification in new products–. Innovations are conditioned by knowledge externalities between a firm’s product divisions and knowledge spillovers in the region.

We demonstrate that simulation and Agent-Based Modeling is a suitable methodology for dealing with this sort of complex problems without losing neither descriptive capacity nor rigorous in formalizations. Moreover, it facilitates the interdisciplinary dialogue between heterogeneous scientific areas.

Keywords: Evolutionary Economics, Economic Geography, industrial concentration, innovation, knowledge spillovers, agent-based modeling.

Contenidos

Figuras.....	xii
Tablas	xv
Introducción.....	1
Antecedentes.....	1
Objetivo	5
Justificación.....	8
Organización del documento	14
1 Nueva Geografía Económica.....	19
1.1 Geografía Económica y Nueva Geografía Económica.....	20
1.1.1 Antecedentes de la Nueva Geografía Económica.....	21
1.1.2 Teoría de comercio, teoría de crecimiento y Nueva Geografía Económica	25
1.2 El modelo de competencia monopolística de Dixit-Stiglitz	27
1.2.1 Limitaciones del modelo de competencia perfecta.....	27
1.2.2 Descripción del modelo	28
1.2.3 El efecto del número de variedades	30
1.3 El modelo de Núcleo-Periferia	31
1.3.1 Bases del Modelo.....	31
1.3.2 Efecto índice de precios	36
1.3.3 Efecto mercado local.....	37
1.3.4 Movilidad de la mano de obra industrial	38
1.3.5 Análisis de los equilibrios del modelo de Núcleo y Periferia.....	45
1.3.6 Causalidades acumulativas	47
1.4 Extensiones del modelo de Núcleo y Periferia.....	51
1.4.1 Causalidad acumulativa con bienes intermedios	51
1.4.2 La concentración industrial.....	52
1.5 Discusión	55

1.6	Apéndice: cálculo del punto de ruptura y punto de sostenimiento ..	56
1.6.1	Punto de ruptura.....	56
1.6.2	Punto de sostenimiento	60
2	Economía Evolucionista y Geografía Económica	64
2.1	Introducción a la Economía Evolucionista.....	65
2.1.1	Evolución de la Economía Evolucionista	66
2.1.2	Objetivos y alcance de la Economía Evolucionista.....	72
2.2	Principales conceptos evolucionistas	74
2.2.1	Fundamentos de la evolución: diversidad, selección y desarrollo.....	74
2.2.2	Selección: ecuación del replicador.....	76
2.2.3	Desarrollo: investigación e innovación.....	77
2.2.4	Micro-diversidad: rutinas y conocimiento	78
2.2.5	Dependencia histórica.....	79
2.3	Modelos evolucionistas de dinámica industrial.....	80
2.3.1	Modelo de industria evolutiva de Nelson y Winter	81
2.3.2	Aproximación algorítmica del modelo de Nelson y Winter	85
2.3.3	Extensión de Winter: regímenes tecnológicos.....	86
2.3.4	Modelo AL de Andersen y Valente	89
2.3.5	Aprendizaje localizado: modelo de Jonard y Yildizoglu.....	94
2.4	Aproximación evolucionista a la Geografía Económica.....	97
2.4.1	Nueva Geografía Económica, Geografía Económica y Economía Evolucionista.....	97
2.4.2	Conceptos evolucionistas en la Geografía Económica	99
2.4.3	De la teoría al diseño de modelos formales	103
2.5	Discusión	107
3	Modelado basado en Agentes y Geografía Económica Evolucionista.....	109
3.1	Sistemas Adaptativos Complejos (SAC)	110
3.1.1	Definición y características de los SAC.....	110
3.1.2	Fenómenos emergentes y ciencia generativa.....	112
3.2	Modelado Basado en Agentes (ABM)	114
3.2.1	Introducción a los Sistemas Multiagente (MAS).....	114

3.2.2	Modelado basado en agentes y sociedades artificiales	115
3.2.3	Metodología del ABM	119
3.2.4	Verificación, validación y replicación de modelos.....	122
3.2.5	ABM y sistemas complejos	124
3.3	Economía Computacional basada en Agentes (ACE).....	127
3.3.1	Integración de los principios evolucionistas y ABM.....	127
3.3.2	Objetivos de ACE	129
3.3.3	Principales líneas de investigación sobre ACE.....	130
3.3.4	¿Qué puede aportar ACE a la Geografía Económica?.....	134
3.3.5	ACE y fenómenos de aglomeración industrial	136
3.4	Discusión	139
4	Modelo evolucionista de una industria innovadora y diferenciada	141
4.1	Limitaciones de modelos previos	142
4.1.1	Modelo de Fujita-Krugman-Venables	143
4.1.2	Familia de modelos evolucionistas de Nelson y Winter.....	144
4.2	Fundamentos de un modelo de Geografía Económica Evolucionista	145
4.2.1	La unidad de estudio: la empresa.....	145
4.2.2	Rutinas	146
4.2.3	Innovación y diferenciación de productos	147
4.2.4	Selección y competencia monopolística	148
4.2.5	Rendimientos crecientes en la innovación.....	149
4.2.6	Knowledge Spillovers localizados.....	150
4.2.7	Causalidad acumulativa de los fenómenos de aglomeración y concentración industrial	151
4.3	Descripción del modelo propuesto.....	153
4.3.1	Suposiciones básicas del modelo	154
4.3.2	El mercado de competencia monopolística.....	156
4.3.3	El ciclo de vida de la industria.....	157
4.3.4	El comportamiento de la empresa.....	159
4.3.5	Innovación y Knowledge Spillovers.....	163
4.3.6	Entrada y salida de empresas	173
4.4	Relaciones y diferencias con otros modelos.....	174

4.5	Discusión	175
4.6	Anexo: descripción algorítmica del modelo	177
5	Fenómenos de aglomeración y concentración industrial	181
5.1	Implementación del modelo y simulaciones	182
5.1.1	Herramienta de implementación y simulación del modelo: REPAST..	182
5.1.2	Análisis de un modelo de simulación basado en agentes	184
5.2	Diseño de los experimentos	187
5.2.1	Estadísticos de concentración industrial y aglomeración espacial	187
5.2.2	Parámetros clave y escenarios de simulación	190
5.3	Fenómenos de concentración industrial	193
5.3.1	Ciclo de vida de la industria como sincronizador de eventos.....	194
5.3.2	Evolución del mercado de competencia monopolística.....	195
5.3.3	Concentración industrial	199
5.3.4	Regularidades de la evolución de la industria.....	200
5.3.5	Distribución del tamaño de las empresas.....	207
5.3.6	Estado de la industria en el largo plazo	210
5.4	Fenómenos de aglomeración industrial	212
5.4.1	Dos regiones: núcleo y periferia	213
5.4.2	Múltiples regiones.....	218
5.5	Knowledge Spillovers	224
5.5.1	Efecto de los knowledge spillovers en la concentración y la aglomeración industrial	225
5.5.2	Regiones con diferentes knowledge spillovers	230
5.5.3	Knowledge spillovers y política regional	234
5.6	Discusión	235
5.7	Anexo: valor de los parámetros para las simulaciones propuestas	237
	Conclusiones	239
	Principales conclusiones de la tesis	239
	Líneas de investigación futuras	244
	Referencias	247

Figuras

Figura 1. Principales líneas de investigación del grupo INSISOC (con detalle de los proyectos y contratos de investigación).	4
Figura 2. Áreas de investigación científica sobre fenómenos de aglomeración y concentración industrial (elaboración propia).	9
Figura 3. Proceso de investigación de esta tesis.	15
Figura 4. Distribución del uso del suelo en el modelo de von Thünen.	22
Figura 5. Gráfico de estados de equilibrio del modelo del multiplicador base para ($\gamma = 0,1; \bar{\alpha} = 0,8$).	25
Figura 6. Situación de equilibrio para una empresa en el modelo de núcleo-periferia. .	41
Figura 7. Entrada de una nueva empresa y efecto índice de precios.	41
Figura 8. Entrada de una nueva empresa y vinculación progresiva.	44
Figura 9. Bifurcación Tomahawk del modelo de Núcleo y Periferia.	46
Figura 10. Vinculaciones progresivas y regresivas como mecanismos del proceso acumulativo en el modelo Núcleo y Periferia (elaboración propia).	49
Figura 11. Diagrama de la causalidad acumulativa y de diversificación presentes en el modelo de Núcleo y Periferia (elaboración propia).	50
Figura 12. Ratio \dot{q}/\dot{n}_f y punto de ruptura T_B	58
Figura 13. Ratio $q_{periferia}/q_{núcleo}$ y punto de sostenimiento T_S	63
Figura 14. Elementos de un modelo económico evolucionista (elaboración propia).	75
Figura 15. Descripción algorítmica del modelo de dinámica industrial de Nelson y Winter (elaboración propia a partir de la versión de Andersen (1996)).	86
Figura 16. Descripción algorítmica del modelo AI de Andersen y Valente (2002).	93
Figura 17. Sistema real y modelo basado en agentes representativo.	116
Figura 18. Metodología del desarrollo de un modelo basado en agentes.	120
Figura 19. Proceso de investigación de esta tesis.	143
Figura 20. Causalidad acumulativa de un modelo de Geografía Económica Evolucionista que explica los fenómenos de concentración industrial y espacial (elaboración propia a partir de la propuesta de Frenkel y Boschma (2007)).	153
Figura 21. Dinámica de la industria como proceso de Markov.	155
Figura 22. Principales características de nuestro modelo evolucionista de una industria innovadora y diferenciada, descritas dentro del marco de análisis evolucionista.	156
Figura 23. Evolución de la renta en la industria para la curva logística de parámetros $\{Y_{ini} = 1, Y_{max} = 100, a = 20, b = 0,03\}$ utilizada en las simulaciones del modelo.	159

Figura 24. Función de probabilidad de innovación para diferentes valores del parámetro productividad de innovación α^n	166
Figura 25. Síntesis de los principales fundamentos teóricos de los modelos de Nueva Geografía Económica, de Nelson y Winter y el modelo propuesto en esta tesis.	175
Figura 26. Diagrama UML de actividad que describe la secuencia de los procedimientos para cada periodo de la simulación.	177
Figura 27. Diagrama UML de actividad que describe el procedimiento <i>vaciar mercado</i>	178
Figura 28. Diagrama de actividad UML que describe el procedimiento <i>actualizar estado de la industria</i>	179
Figura 29. Diagrama de actividad UML que describe el procedimiento <i>ejecutar operaciones</i>	180
Figura 30. Diagrama de las principales clases del modelo de simulación implementado en Repast.	184
Figura 31. Relación entre un experimento, las ejecuciones y el estadístico para la simulación computacional de un modelo basado en agentes.	185
Figura 32. Curva logística de la evolución de la renta.	194
Figura 33. Evolución de la utilidad de los consumidores para diferentes valores de θ	196
Figura 34. Evolución del precio promedio ponderado de las variedades para diferentes valores de θ	197
Figura 35. Evolución del número de variedades de productos de la industria para diferentes valores de θ	198
Figura 36. Evolución del índice de Herfindahl de la industria para diferentes valores de θ	199
Figura 37. Evolución del número de empresas para diferentes valores de θ	202
Figura 38. Entrada y salida de empresas de la industria para diferentes valores de θ ..	202
Figura 39. Evolución de la cuota de mercado del líder para diferentes valores de θ ..	204
Figura 40. Evolución del número de innovaciones de nuevas variedades de productos para diferentes valores de θ	205
Figura 41. Evolución del número de innovaciones de proceso para diferentes valores de θ	206
Figura 42. Distribución final del tamaño de la empresas para dos muestras representativas de $\theta = 0,3$ (izquierda) y $\theta = 0,7$ (derecha).	208
Figura 43. Evolución del capital de las empresas (promedio y máximo) para diferentes valores de θ ..	209
Figura 44. Estimación kernel de la función de distribución del índice de Herfindahl de la industria en el largo plazo $t = 300$ para diferentes valores de θ	212

Figura 45. Evolución del coeficiente de Gini cuando en la industria existen dos regiones para diferentes valores de θ	214
Figura 46. Evolución del índice de Herfindahl cuando en la industria existen dos regiones para diferentes valores de θ	215
Figura 47. Estimación kernel de la función de distribución del coeficiente de Gini en el largo plazo $t = 300$ cuando en la industria existen dos regiones para diferentes valores de θ	218
Figura 48. Evolución del coeficiente de Gini cuando en la industria existen cinco regiones para diferentes valores de θ	220
Figura 49. Evolución del índice de Herfindahl cuando en la industria existen cinco regiones para diferentes valores de θ	221
Figura 50. Estimación kernel de la función de distribución del coeficiente de Gini en el largo plazo $t = 300$ cuando en la industria existen cinco regiones para diferentes valores de θ	224
Figura 51. Contour plot del índice de Herfindahl en el largo plazo cuando variamos simultáneamente los parámetros $(\beta^{empresa}, \beta^{región})$ en un escenario con dos regiones.	227
Figura 52. Contour plot del coeficiente de Gini en el largo plazo cuando variamos simultáneamente los parámetros $(\beta^{empresa}, \beta^{región})$ en un escenario con dos regiones.	228
Figura 53. Contour plot del coeficiente de Gini en el largo plazo cuando variamos simultáneamente los parámetros $\beta^{región}$ de dos regiones.	231
Figura 54. Contour plot del coeficiente de asimetría de la renta entre regiones en el largo plazo cuando variamos simultáneamente el parámetro $\beta^{región}$ de dos regiones.	234

Tablas

Tabla 1. Aproximación iceberg de los costes de transporte.	35
Tabla 2. Resumen de las propiedades de los puntos críticos del modelo de Núcleo y Periferia.	47
Tabla 3. Matriz input-output de las industrias. Se cumple que $\alpha + \gamma + \beta = 1$	53
Tabla 4. Parámetros que caracterizan los regímenes tecnológicos (Winter, 1984).	89
Tabla 5. Indicadores del proceso de innovación observados en las simulaciones.	189
Tabla 6. Indicadores de la industria observados en las simulaciones.	190
Tabla 7. Significado del parámetro θ	191
Tabla 8. Escenarios de simulación propuestos.	192
Tabla 9. Indicadores representativos del estado de la industria en el largo plazo $t = 300$ (promedio y error estándar).	210
Tabla 10. Indicadores representativos del estado de la industria en el largo plazo $t = 300$ (promedio y error estándar) para el escenario con dos regiones.	216
Tabla 11. Comparación del índice de Herfindahl en el largo plazo $t = 300$ entre los escenarios con una región y con dos regiones (promedio y error estándar)..	217
Tabla 12. Indicadores representativos del estado de la industria en el largo plazo $t = 300$ (promedio y error estándar) para el escenario con cinco regiones.	222
Tabla 13. Comparación del índice de Herfindahl en el largo plazo $t = 300$ entre los escenarios con diferentes número de regiones (promedio y error estándar).	222
Tabla 14. Configuración básica de los parámetros de la industria para todos los escenarios de simulación propuestos.	237
Tabla 15. Configuración básica de los parámetros del proceso de innovación para todos los escenarios de simulación propuestos.	237
Tabla 16. Configuración básica de los parámetros de las empresas y divisiones para todos los escenarios de simulación propuestos.	238

“No conozco hecho más alentador que la incuestionable capacidad del hombre para elevar su vida mediante un esfuerzo consciente”
Henry David Thoreau (1817-1862)

Introducción

Antecedentes

El trabajo de esta tesis no sólo responde a un deseo particular en un área de investigación como la Geografía Económica Evolucionista, sino que se enmarca dentro de un interés mucho más amplio por una serie de problemas económicos y sociales que conforman la gran línea de investigación del grupo INSISOC. La motivación de este trabajo no puede, por tanto, comprenderse sin una mención al grupo de investigación con el que colaboro desde hace algunos años.

INSISOC¹ emerge como resultado del trabajo desempeñado años atrás por el Prof. Dr. Cesáreo Hernández dirigiendo la tesis doctoral *“Análisis e Ingeniería de las Instituciones Económicas. Una metodología basada en agentes”*, realizada por el Dr. Adolfo López-Paredes. No obstante, su trabajo seminal (Hernández & Hernández, 1981) ya auspiciaba lo que se convertiría a la postre en el objetivo del grupo *“fomentar la investigación y modelado del comportamiento agregado de los sistemas sociales complejos, a partir de los comportamientos de los individuos que integran el sistema”*.

A pesar de ser un grupo de investigación joven² y de que en su fase inicial adoptó una metodología completamente heterodoxa e innovadora, en la actualidad, con casi una veintena de investigadores, es uno de los grupos de investigación en el campo

¹ El nombre del grupo proviene del libro *“Ingeniería de Sistemas Sociales. Diseño, Modelado y Simulación de Sociedades Artificiales de Agentes”* (López-Paredes, 2004).

² Se considera como hito inicial del grupo el artículo presentado por uno de los directores de esta tesis, el Dr. del Olmo en 1998 *“The Social Dimension of Economics and Multiagent Systems”* (López-Paredes & del Olmo, 1998).

con más presencia en el panorama nacional. Los resultados del grupo dirigido por el Profesor Hernández se materializan en las primeras tesis doctorales en nuestro país que incluyen el modelado basado en agentes en las ciencias sociales en general, y en la ciencia económica en particular, como una tercera vía en la investigación científica: López-Paredes (2000), Pajares (2001), Posada (2005), Pascual (2006), Galán (2007).

INSISOC comenzó sus trabajos aplicando la simulación basada en agentes para el estudio alternativo de problemas que no eran abordables desde la ciencia económica analítica ni computacionalmente. En el período 2001-2004, el proyecto dirigido por el Profesor Hernández “*ISIA: La Investigación Socioeconómica desde la Inteligencia Artificial: Contribuciones en Memoria de Herbert Simon*” y financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología permitió el desarrollo de numerosos trabajos relacionados con la economía como ciencia social: la caracterización de los problemas de negociación bilateral (Hernández & López-Paredes, 1999; López-Paredes, 2001; López-Paredes *et al.*, 2002) y la caracterización de comportamientos en dinámica industrial (Pajares *et al.*, 2003c; Pajares *et al.*, 2004).

Posteriormente, ese bagaje económico se extendió hacia el estudio del comportamiento y la reproducción de agentes artificiales en las subastas (Posada *et al.*, 2004b; Posada *et al.*, 2005b; Posada, 2006; Posada *et al.*, 2006a; Posada *et al.*, 2006b; Santos *et al.*, 2006c); el estudio de mercados artificiales (Pascual *et al.*, 2003b; Pajares *et al.*, 2003d; Pajares *et al.*, 2005a; Lavios *et al.*, 2006; Pascual *et al.*, 2006), imperfecciones de mercado (Izquierdo *et al.*, 2006; Izquierdo & Izquierdo, 2007); el estudio de fenómenos de difusión de conocimiento y redes sociales complejas (Santos *et al.*, 2006a; Santos *et al.*, 2006b); los procesos de innovación y knowledge spillovers (Santos *et al.*, 2005; Santos *et al.*, 2007a); y la teoría de juegos y de cooperación (Galán & Izquierdo, 2005; Galán *et al.*, 2005a; Izquierdo & Izquierdo, 2006; Izquierdo *et al.*, 2007).

A lo largo de este tiempo el grupo ha ido consolidando nuevas líneas de aplicación de los sistemas multiagente más allá de la Teoría Económica. Así, el Prof. del Olmo, investigador principal de “*Integración Empresarial y Gestión de la Cadena de Suministro basada en Sistemas Multiagente*”, lidera una línea de trabajo sobre la aplicación de los sistemas multiagente a la cadena de suministro, a problemas de

scheduling (Arauzo *et al.*, 2004b; Arauzo *et al.*, 2004c; Arauzo *et al.*, 2004d; Arauzo *et al.*, 2005; Arauzo *et al.*, 2006), empresa virtual (Sanz *et al.*, 2004a; Sanz *et al.*, 2004b; Benito *et al.*, 2005) y a la organización de la producción en general (Arauzo *et al.*, 2003; Arauzo *et al.*, 2004a).

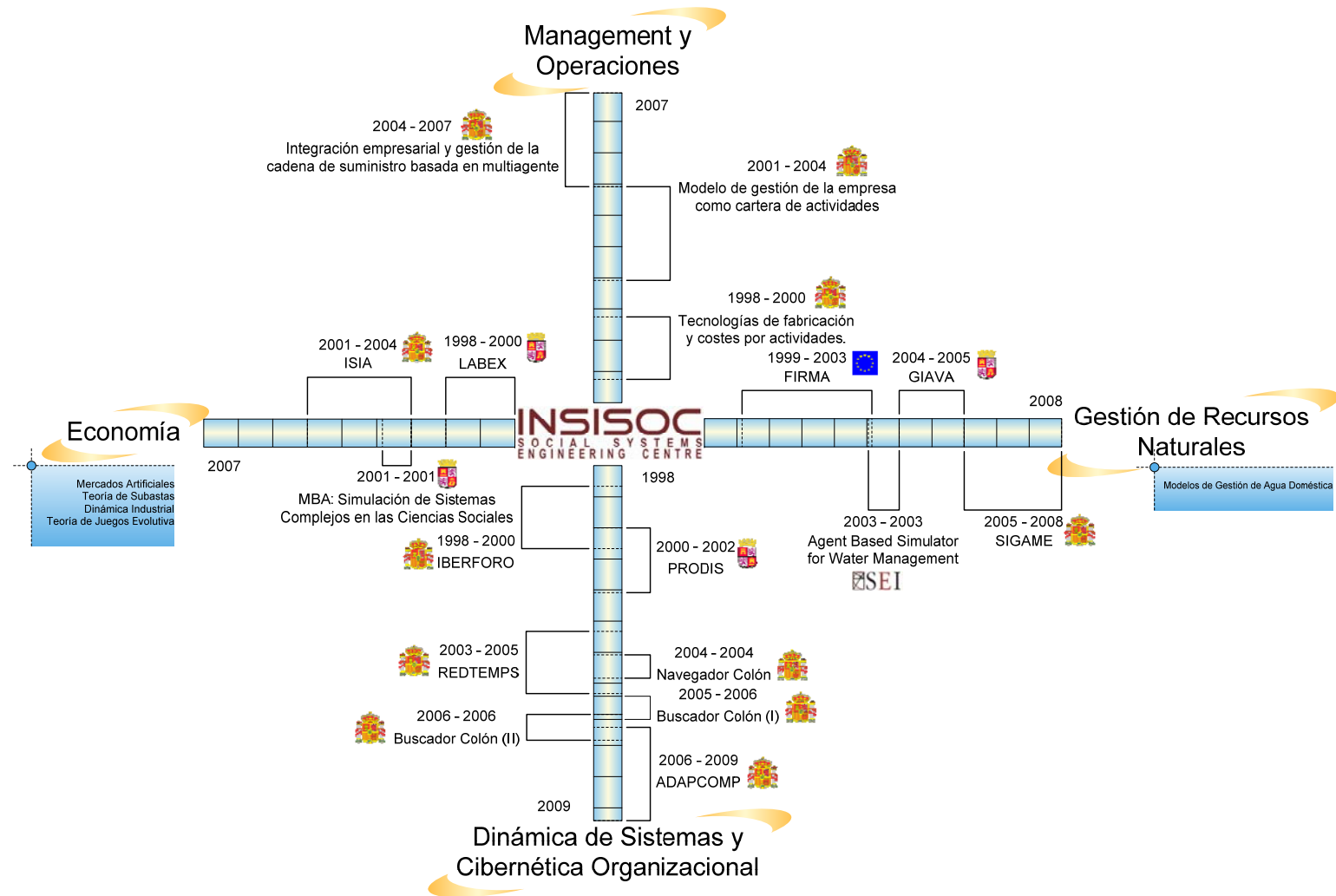


Figura 1. Principales líneas de investigación del grupo INSISOC (con detalle de los proyectos y contratos de investigación).

En el gráfico representamos las tres líneas de aplicación de modelado basado en agentes en las que se trabaja en INSISOC junto con la línea de investigación en Dinámica de Sistemas y Cibernética Organizacional que dirige el Prof. Pérez Ríos.

Otro dominio de aplicación es el que aborda el estudio de la gestión de los recursos naturales. Fruto de esta línea de investigación que dirige el Dr. Adolfo López-Paredes destaca la colaboración del grupo INSISOC en el proyecto *FIRMA (Freshwater Integrated Resource Management with Agents)*, financiado por el V programa Marco de la Unión Europea –el cual supuso en su momento el proyecto más importante de simulación social hasta la fecha en Europa–, así como el proyecto *GIAVA (Gestión integrada del agua con agentes en el área metropolitana de Valladolid)* financiado por la Junta de Castilla y León. Dentro de esta línea de trabajo se inscriben importantes contribuciones a la *gestión doméstica del agua* como (López-Paredes *et al.*, 2005; Galán *et al.*, 2005b; Galán *et al.*, 2007b) y la reciente tesis doctoral del Dr. Galán (2007).

Esta tesis se beneficia sin duda alguna de la experiencia y el conocimiento generado en el grupo a lo largo de estos años, y principalmente del intercambio de ideas y de la cultura de investigación que se ha creado dentro del grupo INSISOC.

Objetivo

El *objetivo* de esta tesis es diseñar, implementar y analizar un modelo evolucionista de dinámica industrial que contribuya a comprender mejor los fenómenos de aglomeración y concentración industrial.

Este objetivo se concreta en los siguientes objetivos específicos:

- Formalizar mediante el Modelado Basado en Agentes una aproximación teórica a los fenómenos de aglomeración y concentración industrial construida sobre los principios de la Economía Evolucionista y que además incorpore importantes aportaciones de la Geografía Económica y la Geografía de la Innovación.
- Demostrar que el modelado y la simulación basadas en agentes constituyen una metodología que hace posible abordar este tipo de problemas complejos, sin perder capacidad descriptiva de los fenómenos ni rigurosidad en las formalizaciones propuestas, aunque éstas sean computacionales y no analíticas.

Nuestra *tesis* es, que los fenómenos de aglomeración y concentración de muchas industrias pueden explicarse a partir de los procesos de selección del mercado y los procesos de desarrollo (innovaciones) que las diferentes empresas llevan a cabo. Esta

tesis supone que la unidad de estudio de la dinámica económico-espacial de la industria debe ser la empresa. Centrar la atención en la empresa no conlleva obligatoriamente dejar de lado otras variables puramente geográficas, como la diversidad cultural, social e institucional propias de cada región³. La realidad es que una de las características de la empresa es que está ubicada en una localización concreta, que puede condicionar su evolución positiva o negativamente. Sin embargo, la presión de selección que ejerce el mercado, en un contexto cada vez más internacionalizado por el fenómeno de la globalización, opera siempre directamente sobre las empresas de la industria y no sobre otras entidades. Como resultado, aquellas organizaciones que disfrutaban de ventajas competitivas prosperan y consecuentemente las regiones donde desarrollan sus actividades. Por tanto, nuestra hipótesis de partida puede resumirse en la idea de que si hay regiones más competitivas que otras es porque albergan empresas más competitivas, que tienen más éxito en la selección que impone el mercado. Por supuesto que no negamos el papel institucional y la importancia de las políticas industriales y tecnológicas, pero al final, este papel se traduce principalmente en la creación de condiciones favorables para que las empresas sean más competitivas (Pajares *et al.*, 2003b).

Sabemos que la dimensión geográfica no es solamente un factor contextual que condiciona los fenómenos económicos, sino que constituye una dimensión más de la industria que evoluciona simultáneamente e interrelacionadamente con la dimensión económica. Sin embargo, esto dificulta enormemente el diseño de cualquier modelo económico-geográfico, que inevitablemente va a tender a prestar una mayor atención a una de las dimensiones en detrimento de la otra. En cierta medida nuestra tesis también cae en esta simplificación, no exenta de error, pues centramos nuestra atención principalmente en evolución de la dimensión económica de la industria, siendo la evolución espacial un reflejo de los correspondientes procesos evolutivos de selección y desarrollo.

³ Con el propósito de no complicar en exceso el modelo evolucionista que proponemos en esta tesis, hemos dejado a un lado esta dimensión más puramente geográfica para centrar nuestro análisis en aquellos aspectos económicos como los procesos de innovación o los *knowledge spillovers*.

Nuestro trabajo parte de las siguientes *hipótesis*, que se fundamentan en una aproximación evolucionista al hecho económico en general y a los fenómenos de aglomeración y concentración industrial en particular:

- La industria se caracteriza principalmente por una *diversidad* de empresas, que difieren en sus capacidades, conocimiento, rutinas, y también en las variedades de productos que fabrican. Estas diferencias en las características y comportamientos de los agentes económicos tendrán significación en los procesos de selección que impulsa el mercado.
- Las empresas se enfrentan a un mercado de *competencia monopolística*, donde disfrutan de un cierto poder de monopolio en tanto que los consumidores distinguen imperfectamente entre las diferentes variedades de productos. La presión de la *selección* aumenta conforme aparecen más variedades de productos en el mercado, dependiendo del grado de preferencia por la variedad que muestran los consumidores.
- La *innovación* juega un papel fundamental como fuente de diversidad y ventajas competitivas. Las empresas no sólo tratan de mejorar los procesos productivos y los productos que fabrican, sino que buscan desarrollar nuevas variedades de productos para crecer y fortalecer su posición en la industria.
- La innovación es por su propia naturaleza *incierta*, pues sucede bajo condiciones de incertidumbre y competitividad empresarial. El conocimiento de las empresas, su capacidad de comprender y aprender de fuentes externas, las sinergias de conocimiento que pueden darse cuando la empresa diversifica su actividad desarrollando nuevas variedades de productos, y los *knowledge spillovers* fruto de la movilidad de la mano de obra y la difusión de conocimiento a través de contactos personales, influyen directamente en los resultados de la innovación.

La principal contribución del modelo que pretendemos desarrollar es *integrar* en una sola *propuesta formal* los principales principios teóricos de la Economía Evolucionista junto con otras importantes aproximaciones a los fenómenos de aglomeración industrial provenientes principalmente de la Geografía Económica y la Geografía de la Innovación. De la Economía Evolucionista recogemos los principios de diversidad, desarrollo y selección, además de la formalización matemática y

algorítmica. De la Geografía Económica y la Geografía de la Innovación tomamos las diferentes teorías sobre la innovación y los knowledge spillovers como factores condicionantes de la aglomeración espacial. Finalmente, el Modelado Basado en Agentes nos va a facilitar esta síntesis, que de otra forma hubiera sido imposible realizar.

Creemos que la construcción de modelos mediante una metodología *bottom-up* (abajo-a-arriba) utilizando el marco lógico que nos ofrece el Modelado Basado en Agentes, es imprescindible en el estudio de fenómenos complejos como los que propone la Geografía Económica. La simulación computacional basada en agentes permite una aproximación integradora en las Ciencias Sociales, y además nos dota de herramientas para la investigación en forma de laboratorios computacionales.

Justificación

Complejidad de los fenómenos de aglomeración y concentración industrial

La Teoría Económica en general ha prestado poca atención a la dimensión espacial de la economía (Fujita *et al*, 1999), y más concretamente a los fenómenos de aglomeración y concentración industrial⁴. Sin embargo, en las dos últimas décadas ha ido creciendo significativamente la atención por este tipo de fenómenos en disciplinas científicas muy diversas. Las razones principales de este interés se encuentran en que la aglomeración industrial suele ser sinónimo de prosperidad y crecimiento económico; de hecho, ocupa un lugar preferente en muchas de las políticas regionales de desarrollo (Pajares *et al*, 2003b), y además, existen evidencias empíricas de que este tipo de ecosistemas socio-económicos soporta mejor las fluctuaciones de los ciclos económicos (Porter, 1990).

La Figura 2 resume gráficamente las diferentes disciplinas científicas que con mayor o menor intensidad han puesto su atención en los fenómenos de aglomeración y

⁴ La Geografía Económica suele emplear el término de *aglomeración*, introducido inicialmente por Weber (1929), en vez del de *concentración* para referirse a la dimensión espacial de las industrias. Nosotros en esta tesis trataremos también de utilizar el concepto de aglomeración para referirnos a la dimensión espacial (grado de aglomeración de la industria en determinadas regiones), y dejaremos el término de concentración para la dimensión puramente económica (grado de concentración de la industria en pocas empresas).

concentración industrial. Esta figura muestra la enorme complejidad de este tipo de problemas, en tanto que se han formulado muchas y diversas teorías para explicarlos –todas tienen sus razones y ninguna posee una respuesta completa–.

Para Porter (1990), la *competición* es la fuerza que lidera el desarrollo de los clusters industriales: la rivalidad entre empresas obliga a las mismas a innovar y desarrollar nuevos productos y tecnologías. Porter construye un marco conceptual, muy al estilo de la literatura sobre Administración y Gestión de Empresas, donde sitúa lo que a su juicio son los *factores de éxito* de las empresas de un cluster⁵. No cabe duda de que es una elegante síntesis de muchos conceptos, si bien, apenas aporta pistas sobre las bases microeconómicas que permiten explicar este tipo de fenómenos.

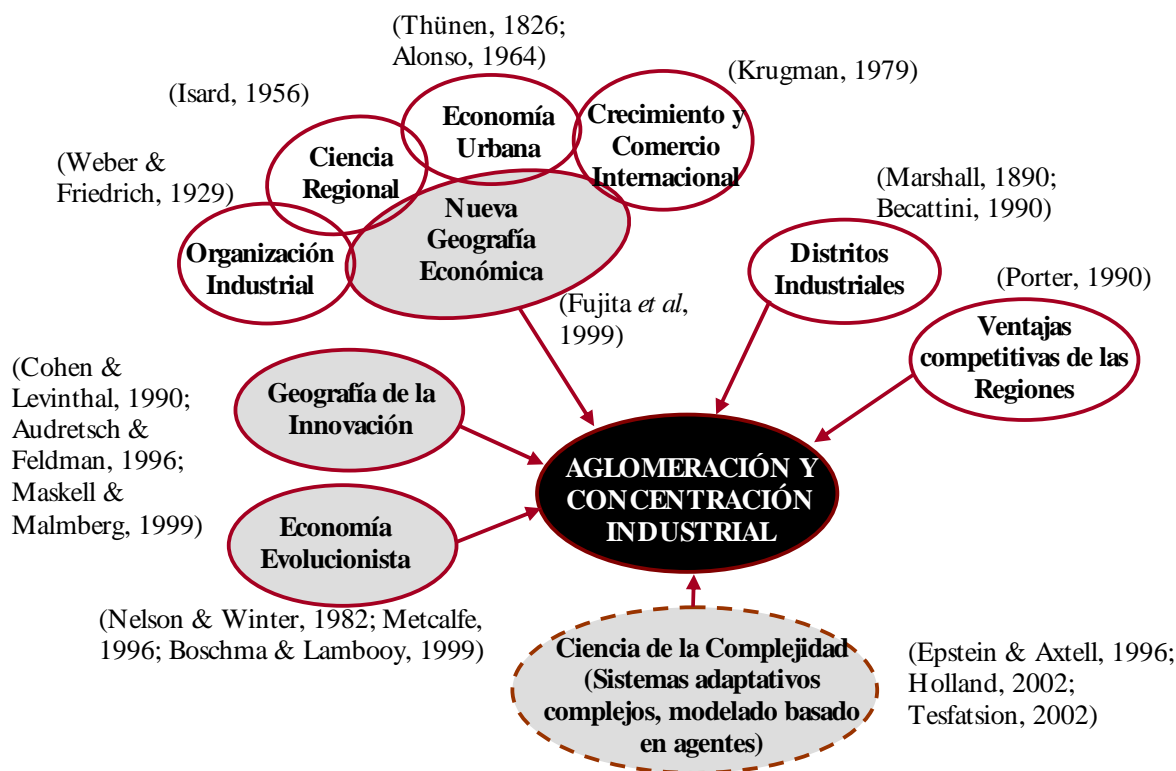


Figura 2. Áreas de investigación científica sobre fenómenos de aglomeración y concentración industrial (elaboración propia).

Resaltadas en gris aparecen las fuentes principales de nuestro trabajo: la Nueva Geografía Económica, la Economía Evolucionista, la Geografía de la Innovación y la Ciencia de la Complejidad.

⁵ Es el conocido *diamante* de Porter, construido sobre cuatro bloques temáticos: estrategia de la empresa, factores productivos, demanda local e industrias relacionadas.

En contraposición a Porter, la literatura italiana sobre *distritos industriales* estudia los modelos de *cooperación* entre empresas basados en la confianza, la tradición y la cultura, característicos de los clusters italianos (Becattini, 1990b). Los distritos italianos⁶ están formados principalmente por pequeñas y medianas empresas, que encuentran en la cooperación el medio de conseguir las ventajas de escala de las que disfrutaban las grandes compañías, además de minimizar riesgos y repartir inversiones que de otra forma serían inabordables por una empresa sola. Profundizando en este argumento, los investigadores italianos estudian la importancia del sistema social y cultural en el que se desarrollan estos procesos de colaboración, que acentúan las diferencias en la evolución de las industrias en las regiones y países.

La *Organización Industrial* argumenta su aproximación teórica desde la perspectiva de la elección de la localización de las empresas (Weber & Friedrich, 1929). El factor clave son las economías de aglomeración, basadas en los menores costes que tienen que afrontar las empresas por el hecho de estar agrupadas: menores costes de aprovisionamiento por la cercanía a los proveedores, uso de una infraestructura compartida, disponibilidad de servicios más especializados. Suelen precisar estas externalidades diferenciando entre las *economías de localización* (externalidades puramente dependientes de la proximidad entre empresas) y las *economías de urbanización* (externalidades dependientes de la situación en una ciudad particular).

El modelo de distribución del suelo agrícola de von Thünen (1826) ha sido posteriormente recuperado por la *Economía Urbana* para tratar de explicar otro tipo de fenómenos espaciales como la *distribución del uso del suelo* en las ciudades (Alonso, 1964), caracterizadas por un barrio comercial central y un precio del suelo decreciente con la distancia a este centro. Si bien estos modelos no explican por sí mismo la aparición de un centro en torno al cual se distribuyen las actividades económicas, se comienza a utilizar el concepto de equilibrio de fuerzas de aglomeración y de dispersión que va a ser incorporado en la literatura de la Nueva Geografía Económica.

La *Ciencia Regional* representa otra área de conocimiento que también ha centrado su atención en los problemas de economía espacial y localización (Isard,

⁶ La escuela italiana suele hablar de *distritos industriales*, en vez de cluster industriales, para destacar las particularidades de estas aglomeraciones italianas.

1956). En general, muchas de sus aportaciones responden más a respuestas intuitivas que a teorías con una fundamentación microeconómica (Fujita *et al*, 1999, 34-43). Sin embargo, algunas de estas explicaciones, como la *teoría del multiplicador base*⁷ que defiende que el verdadero motor de desarrollo de una ciudad es su base exportadora, han sido incorporadas también por la Nueva Geografía Económica.

La nueva teoría económica sobre *Comercio Internacional y Crecimiento* (Barro & Martin, 1995) ha propuesto nuevos modelos analíticos sobre los que se han establecido las bases formales de una línea de investigación genuinamente económica que llamamos *Nueva Geografía Económica* (Krugman, 1998). Su particular visión del problema, una aproximación muy simplificada de los fenómenos económico-espaciales que no contempla muchas de las variables económico-geográficas empleadas por otras áreas científicas, permite a cambio una formalización matemática completa del mismo (Neary, 2001).

Habitualmente la investigación sobre la economía espacial recurre al concepto de *economías de aglomeración* para explicar la emergencia de fenómenos de aglomeración. La cuestión que se plantea el investigador a continuación es la de cómo explicar la naturaleza y los mecanismos de estas economías, si quiere ir más allá del argumento casi tautológico de que existen aglomeraciones porque existen beneficios para que las empresas estén juntas. Es aquí donde la Nueva Geografía Económica hace una interesante aportación al ofrecer un modelo formal que permite entender estas economías de aglomeración.

Naturaleza evolucionista de los fenómenos de aglomeración y concentración industrial

En nuestra opinión, las bases teóricas de la Nueva Geografía Económica resultan insuficientes para comprender la complejidad de los fenómenos económico-espaciales. La *Economía Evolucionista* nos alerta de la distancia entre la abstracción teórica de un sistema económico en equilibrio y homogéneo (sin la cual no sería posible proponer y resolver el modelo matemático propuesto por la Nueva Geografía Económica) y la realidad tozudamente dinámica y heterogénea (Boschma & Frenken, 2006b).

⁷ Una descripción de esta teoría se encuentra en el capítulo 1.

La naturaleza de los fenómenos de aglomeración y concentración industrial nos invita a tener en cuenta nuevas claves para tratar de estudiarlos, más allá de los presupuestos económicos clásicos. El ojo del economista evolucionista descubre unos agentes económicos no homogéneos, que difieren en sus características y comportamientos, que tampoco son perfectamente racionales, ni toman decisiones óptimas ni disponen de información perfecta del mercado. Una aproximación evolutiva a los fenómenos económico-espaciales tiene en cuenta siempre su proceso dinámico y evolutivo, donde la diversidad de los agentes económicos y del espacio geográfico juegan un papel relevante.

La Economía Evolucionista ha desarrollado una importante línea de investigación en torno a la dinámica industrial. Fruto de este trabajo se han propuesto interesantes explicaciones sobre: la evolución de las industrias y la tendencia a mostrar significativos niveles de concentración industrial (Nelson & Winter, 1982); la importancia de las fuentes de la innovación (Winter, 1984); las regularidades (*stylized facts*) de muchas industrias (Dosi *et al.*, 1995); el efecto del aprendizaje localizado y los rendimientos crecientes en la diversidad de comportamientos de las empresas (Jonard & Yildizoglu, 1998); o las relaciones entre los procesos de innovación y el ciclo de vida de las industrias (Pajares, 2001). Sin embargo, muchos de estos modelos no han tenido en cuenta la dimensión espacial de la industria. Por esta razón, con esta tesis queremos dar un paso adelante en la investigación sobre dinámica industrial proponiendo un modelo evolucionista que contempla no solo la dinámica de concentración sino también la de aglomeración de las industrias.

La aproximación evolucionista a los fenómenos de aglomeración y concentración industrial puede verse enriquecida con las aportaciones de otras disciplinas. La *Geografía de la Innovación* ofrece importantes pistas sobre la innovación y los *knowledge spillovers* (Feldman, 1994; Audretsch & Feldman, 1996), que juegan un papel fundamental en los procesos de desarrollo que defiende la Economía Evolucionista. Profundizando en esta línea, descubrimos la importancia del *conocimiento* en las empresas (Maskell & Malmberg, 1999b), y cómo éste influye significativamente en sus *capacidades* para aprender y adaptarse (Cohen & Levinthal, 1990) a un entorno económico-espacial en constante evolución.

Necesidad de formalizar las teorías sobre aglomeración y concentración industrial

Resulta imprescindible hacer una referencia explícita al marco metodológico más idóneo para el estudio de este tipo de fenómenos. Hemos visto que desde distintas disciplinas científicas se utilizan diferentes argumentos para explicar los fenómenos de aglomeración y concentración industrial. A esta diversidad de teorías, se une la dificultad de formalizar las aproximaciones teóricas en algún tipo de modelo, ya sea analítico o computacional, algo siempre deseable si realmente se pretende comprender en profundidad la naturaleza de estos fenómenos.

Bajo la *Ciencia de la Complejidad* agrupamos un heterogéneo grupo de aproximaciones teóricas y metodológicas al estudio de sistemas complejos, tanto físicos, como biológicos, sociales y económicos. Una importante aportación son los *Sistemas Complejos Adaptativos (SAC)*, que proponen un método científico de investigación en torno la unidad constituyente del sistema, el agente, y sus propiedades, comportamientos e interacciones con el entorno.

El *Modelado Basado en Agentes (ABM)* y la simulación computacional son la expresión práctica del paradigma de los SAC. ABM no sólo aprovecha el desarrollo de la Ciencia Computacional, sino que desarrolla una aproximación *bottom-up* que permite un modelado más fiel a la realidad, por cuanto recogemos con más detalle las características de las partes que lo integran. Además nos permite crear herramientas computacionales a modo de laboratorios experimentales virtuales muy deseables en disciplinas científicas como las Ciencias Sociales.

La integración de esta metodología de investigación con los principios evolucionistas ha dado origen a una incipiente disciplina que denominamos *Economía Computacional basada en Agentes (ACE)*. En nuestra opinión, ACE tiene una prometedora línea de investigación en los fenómenos de aglomeración y concentración industrial pues permite superar muchas de las dificultades inherentes al estudio de la complejidad de los fenómenos económico-espaciales, y además nos ofrece un deseable y necesario punto de encuentro para el diálogo entre disciplinas heterogéneas como la Geografía Económica, la Geografía de la Innovación y la Economía Evolucionista.

No obstante, debemos señalar que la actual aplicación de ACE en el estudio de fenómenos económico-espaciales constituye una línea de investigación todavía muy inmadura y terriblemente heterogénea. En general, encontramos en estos trabajos la ausencia de un cuerpo teórico formal universalmente aceptado por todos, entre otras razones, porque el paradigma evolucionista que alimenta esta investigación carece también de ese consenso formal. Por esta razón nos parece especialmente importante definir los fundamentos teóricos sobre los que, a nuestro juicio, construir una aproximación teórica a los fenómenos de aglomeración y concentración industrial, además de implementar un modelo particular de dinámica industrial que nos permita estudiar algunos detalles de estos fenómenos.

Organización del documento

El trabajo de esta tesis se puede resumir gráficamente mediante el *roadmap* de las diferentes etapas que hemos recorrido hasta desarrollar una propuesta novedosa al estudio de los fenómenos de aglomeración industrial, en forma de un modelo basado en agentes de una industria innovadora y diferenciada. La Figura 3 muestra la secuencia de nuestra investigación. Los fundamentos de nuestro modelo son claramente evolucionistas y tratan de ser fieles a los principios evolucionistas contenidos en los trabajos de Nelson y Winter (1982). Sin embargo, y aunque discrepamos significativamente de la aproximación analítica que ofrece la Nueva Geografía Económica, entendemos que algunas de sus aportaciones son interesantes y por ello las hemos tenido en cuenta en nuestra investigación.

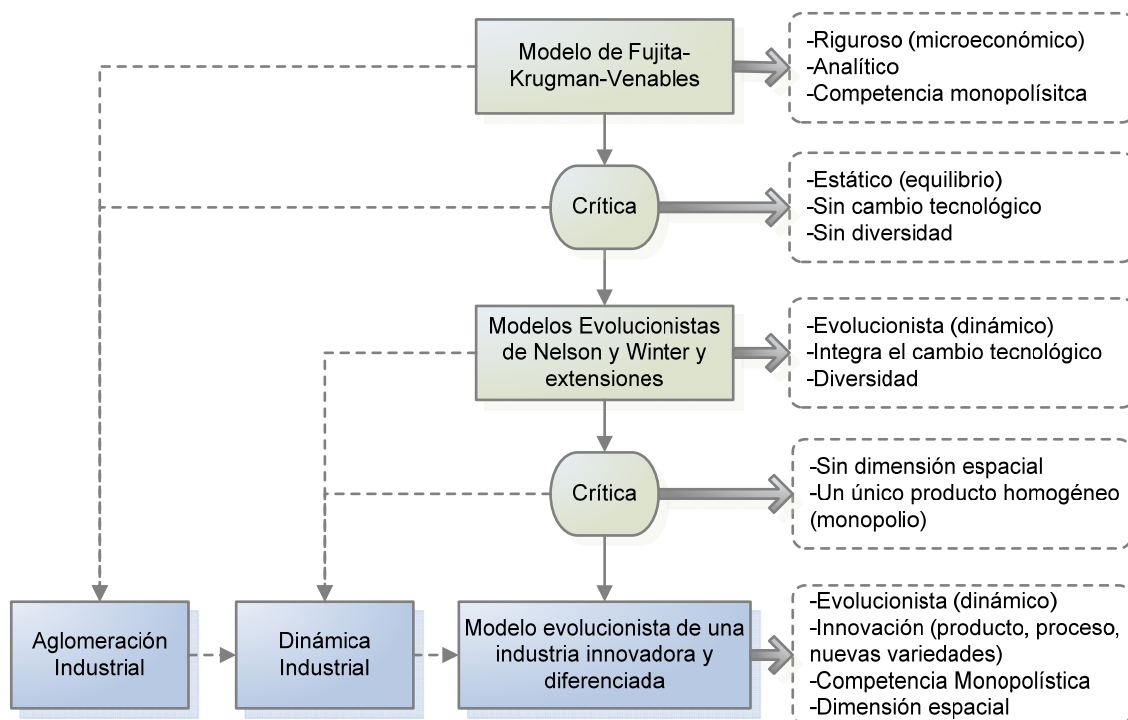


Figura 3. Proceso de investigación de esta tesis.

Hemos partido de una revisión crítica de la aproximación de la Nueva Geografía Económica a los fenómenos de aglomeración espacial; después hemos recogido los principios de la Economía Evolucionista y revisado las aportaciones hechas principalmente a los problemas de dinámica industrial; finalmente hemos propuesto un nuevo modelo formal de los fenómenos de aglomeración y concentración industrial, construido sobre los principios evolucionistas y otras importantes aportaciones de la Geografía Económica y la Geografía de la Innovación, aprovechando la metodología del Modelado Basado en Agentes.

La tesis está estructurada en cinco capítulos. En el *capítulo 1* recogemos las recientes aportaciones hechas en el área de la Geografía Económica, en lo que se ha bautizado como *Nueva Geografía Económica*. Describimos las bases teóricas de la familia de modelos propuestos por Krugman, Fujita y Venables (1999), construidos sobre la aproximación analítica a la competencia monopolística de Dixit y Stiglitz (1977). Aunque responde a una aproximación muy simplificada del problema, y deja a un lado otras variables económico-geográficas tradicionalmente destacadas por la Geografía Económica y la Geografía de la Innovación, ofrece claves interesantes para comprender la dimensión más puramente económica de los fenómenos de aglomeración.

En el *capítulo 2* introducimos el paradigma evolucionista al estudio de la Economía y más concretamente al estudio de los fenómenos de dinámica industrial. A diferencia de la nueva Geografía Económica que impone importantes restricciones en sus modelos analíticos, la Economía Evolucionista ofrece una interpretación de los fenómenos económico-espaciales más próxima a la realidad: una diversidad de agentes que difieren en su conocimiento y capacidades, sobre los que operan los procesos de selección que albergan los mecanismos de replicación de los agentes mejor adaptados y los procesos de desarrollo que agrupan las actividades de investigación e innovación por las que los agentes crean nueva diversidad. Expondremos además que, en nuestra opinión, la incorporación de la dimensión espacial en los modelos evolutivos representa un paso lógico y natural en el desarrollo de la Teoría Económica Evolucionista.

En el *capítulo 3* hacemos una síntesis de la metodología y herramientas que empleamos en nuestra investigación. Dentro del marco teórico de los Sistemas Adaptativos Complejos, encontramos en el Modelado Basado en Agentes el instrumento más adecuado para poder construir una propuesta formal *bottom-up* a los fenómenos de aglomeración y concentración industrial, que además nos permite integrar los principales argumentos teóricos de la Economía Evolucionista, la Geografía Económica y la Geografía de la Innovación.

La aportación fundamental del trabajo de esta tesis se recoge en el *capítulo 4*: una formalización de las diferentes teorías sobre los fenómenos de aglomeración y concentración industrial, estudiadas en capítulos anteriores, en un modelo de simulación computacional basado en agentes. Como en muchos de los modelos evolucionistas de dinámica industrial, la innovación juega un papel fundamental como motor de transformación y desarrollo de la industria, pero a diferencia de ellos, damos un paso adelante al tener en cuenta también la evolución espacial de la industria y la influencia que algunos fenómenos localizados como los knowledge spillovers tienen sobre su evolución. En este capítulo exponemos una cadena causal, que llamamos causalidad acumulativa, síntesis de los principios de la Economía Evolucionista y otras aportaciones provenientes de la Geografía Económica y la Geografía de la Innovación, que explica muchos de los fenómenos de aglomeración y concentración industrial.

En el *capítulo 5* analizamos mediante simulación computacional el modelo de industria innovadora y diferenciada propuesto. Demostraremos que mediante este modelo es posible dar una explicación a los fenómenos de aglomeración y concentración industrial desde una aproximación evolucionista, donde los procesos de innovación que dirigen el cambio y crecimiento de las empresas y las regiones se ven influenciados por las características del mercado y los knowledge spillovers.

Por último, en las *conclusiones* resumimos los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones de los escenarios propuestos, así como las lecciones metodológicas del trabajo de investigación realizado. Indicamos también posibles extensiones de la investigación a partir de este trabajo.

“It is better to be vaguely right than precisely wrong”
John Maynard Keynes (1883-1946)

Capítulo 1

Nueva Geografía Económica

En este capítulo recogemos las recientes aportaciones hechas en el área de la Geografía Económica, en lo que algunos autores han bautizado Nueva Geografía Económica. El desarrollo de las teorías económicas sobre comercio internacional y crecimiento, y la formalización de nuevos modelos matemáticos a la teoría de la competencia monopolística, ha facilitado la aparición de esta nueva aproximación a los fenómenos de economía espacial.

El resultado puede parecer una visión algo particular y simplificada del problema, pues no contempla muchas de las variables económico-geográficas tradicionalmente utilizadas por otras líneas de investigación como la Ciencia Regional o la Geografía de la Innovación. Sin embargo, pensamos que ofrece claves muy interesantes para comprender la dimensión más puramente económica de los fenómenos de aglomeración.

La estructura de este capítulo es la siguiente: en el primer apartado hacemos una introducción a la Nueva Geografía Económica, sus principales antecedentes, así como una mención especial a la teoría de comercio y la teoría de crecimiento con la que comparte orígenes y herramienta matemática.

En el siguiente apartado, exponemos el *modelo de competencia monopolística de Dixit-Stiglitz* que forma el núcleo del sistema económico de los modelos de Geografía Económica. Una particular aproximación analítica a la teoría de competencia

monopolística que trata de superar las principales limitaciones del modelo general de equilibrio de competencia perfecta.

Posteriormente analizaremos con detalle el *modelo de Núcleo y Periferia* que representa el corazón de toda la familia de modelos de economía espacial: un mundo Dixit-Stiglitz donde los fenómenos de aglomeración emergen de las decisiones e interacciones de los consumidores que aprecian la variedad, empresas que disfrutan de economías de escala, costes de transporte que condicionan el comercio interregional y una mano de obra industrial que se mueve entre las regiones buscando mejores salarios.

Finalmente comentaremos algunas extensiones al modelo base que incorporan el comercio de bienes intermedios en la industria. Aunque no cambian el análisis analítico del modelo de Núcleo y Periferia, permiten explicar de otra forma los fenómenos de aglomeración y la especialización de las regiones sin requerir la movilidad de los trabajadores.

1.1 Geografía Económica y Nueva Geografía Económica

La teoría económica en general ha prestado poca atención a la dimensión espacial de la economía⁸ (Fujita *et al*, 1999), dejando el estudio de la distribución espacial de las actividades económicas a una rama de la Geografía que llamamos Geografía Económica⁹. La imposibilidad de introducir la variable espacial en el modelo general de equilibrio ha sido sin lugar a dudas la razón de este consciente olvido por la Economía.

Sin embargo, recientemente, en la nueva teoría económica sobre comercio internacional y crecimiento (Barro & Martin, 1995) se han propuesto nuevos modelos económicos que permiten establecer las bases formales desde las que se ha comenzado a estudiar los fenómenos de aglomeración espacial. Esta nueva línea de investigación

⁸ Un ejemplo de esta falta de interés lo encontramos en la ausencia de cualquier problema de economía espacial en la mayoría de los libros de texto de Economía.

⁹ Es una clasificación aproximada, pues encontramos en la literatura científica diversas áreas de conocimiento que han mostrado interés por el estudio de fenómenos económico-espaciales: teoría de localización (Weber & Friedrich, 1929), economía urbana (Alonso, 1964), ciencia regional (Isard, 1956), geografía de la innovación (Feldman, 1994), por citar algunos ejemplos.

genuinamente económica ha dado origen a lo que algunos autores llaman Nueva Geografía Económica (Krugman, 1998).

En palabras de Fujita y Krugman (2004), la Nueva Geografía Económica persigue “*modelizar las causas de los rendimientos crecientes de concentración espacial*” describiendo desde una perspectiva microeconómica “*las fuerzas centrípetas que atraen las actividades económicas y las fuerzas centrífugas que las apartan*”.

Este redescubrimiento de la Geografía Económica por parte de algunos economistas y la utilización de un modelo analítico muy particular, ha chocado con otras líneas de investigación no puramente económicas que venían trabajando en estos temas durante bastante tiempo. Sin entrar en una discusión a nuestro juicio estéril sobre quién tiene razón y qué razones tiene, sí cabe decir que los modelos de la Nueva Geografía Económica, aunque con importantes simplificaciones del mundo real, ofrecen un marco económico riguroso que no ha de menospreciarse simplemente porque llega con algo de retraso al debate científico.

1.1.1 Antecedentes de la Nueva Geografía Económica

Nos parece interesante recoger en este apartado aquellos antecedentes a la Nueva Geografía Económica¹⁰ que anticipan algunos de los resultados que ofrecen sus modelos, y que veremos con detalle en los puntos 1.2 y 1.3. La idea de equilibrio de fuerzas centrífugas y centrípetas, o el balance entre economías de escala, costes de transporte y tamaño del mercado local, fueron ya propuestas mucho antes de que se publicaran los primeros modelos de la Nueva Geografía Económica.

Modelo de von Thünen

A von Thünen se le reconoce el mérito de ser el primer economista en resolver un problema espacial, como es la organización del uso del suelo, desde claves económicas. Aunque su obra pasó desapercibida durante muchos años, su modelo ha sido posteriormente recuperado por la Economía Urbana, rama de la Economía

¹⁰ Una lectura más completa la encontramos en los primeros capítulos del libro “*Economía Espacial*” (Fujita *et al*, 1999), aunque recomendamos especialmente el repaso que Fujita y Krugman hacen en un diálogo espontáneo sobre la nueva Geografía Económica (Fujita & Krugman, 2004).

preocupada por el estudio de las ciudades y de los patrones espaciales que aparecen en su desarrollo.

Von Thünen (1826) concibió un modelo formado por una ciudad, que ocupa el centro del espacio, rodeada de tierras para el cultivo y pastoreo de animales que pueden ser utilizadas por agricultores y ganaderos. Su modelo plantea un dilema concreto, en la medida en que cada actividad tiene asociado un rendimiento diferente, junto con un coste del suelo y un coste de transporte que dependen de la proximidad a la ciudad. Suponiendo un mercado de competencia perfecta del alquiler del suelo, von Thünen demostró que bajo estas hipótesis surge una distribución del uso del suelo radial, asociada a un gradiente decreciente del precio del alquiler del suelo que tiene su máximo en las puertas de la ciudad (ver Figura 4).

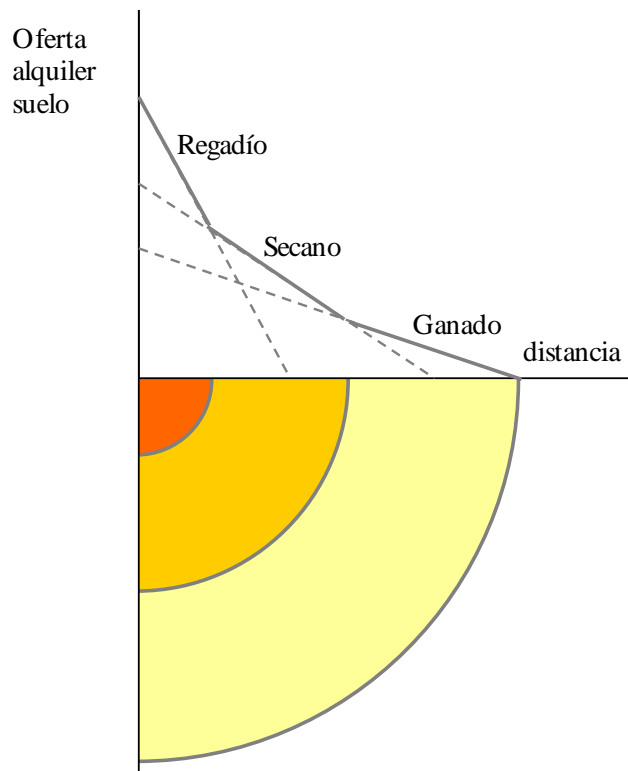


Figura 4. Distribución del uso del suelo en el modelo de von Thünen.

El gráfico superior presenta las curvas de los precios de alquiler que cada tipo de actividad del campo está dispuesta a pagar según la distancia a la ciudad. El precio máximo tiene en cuenta los rendimientos, los costes de transporte y la demanda de productos de la ciudad. La envolvente de estas curvas representa el gradiente del precio del suelo, que origina una distribución espacial radial económicamente eficiente mostrada en el gráfico inferior.

Modelos semejantes se han utilizado para explicar la distribución del uso del suelo en las ciudades (Alonso, 1964), donde suele haber un problema parecido al formulado por von Thünen con un barrio comercial central y un precio del suelo decreciente con la distancia al centro. Este modelo no explica por sí mismo la aparición de un centro en torno al cual se distribuyen las actividades económicas, pero ya introduce el concepto de equilibrio de fuerzas, en este caso entre los costes de transporte y el precio de alquiler que diverge por la existencia de diferentes rendimientos en las actividades productivas.

Teoría del lugar central

La teoría del lugar central pretende dar una explicación del tamaño de las ciudades (Lösch, 1954). El razonamiento es bastante intuitivo: un mundo con una agricultura uniformemente repartida, donde existen otras actividades que disfrutan de economías de escala y que ofrecen sus productos y servicios a la agricultura, da origen a la aparición de diferentes *lugares centrales* que concentran estas actividades.

El tamaño de cada localización central depende de la relación entre las economías de escala y los costes de transporte en los que se incurre para vender en el mercado de alrededor. Esta teoría tampoco explica cómo surgen los lugares centrales, pero introduce un argumento que será recurrente en los modelos de la Nueva Geografía Económica que veremos a lo largo del capítulo: el balance entre costes de transporte y economías de escala.

Teoría del multiplicador base

La Ciencia Regional representa otra área de conocimiento que también ha centrado su atención en los problemas de economía espacial y localización (Isard, 1956). Para algunos economistas sus teorías adolecen en ocasiones de rigor económico y responden más a respuestas intuitivas a los fenómenos (Fujita *et al*, 1999, 34-43). Sin embargo, encontramos una interesante aportación de la Ciencia Regional en la *teoría del multiplicador base*.

Podríamos preguntarnos si todas las actividades económicas de una ciudad contribuyen por igual a su desarrollo. Esta teoría entiende que no, y divide la economía de una ciudad o región en dos categorías: una *base exportadora* que satisface una

demanda externa, y una *base local* que responde únicamente a la demanda interna. El análisis del multiplicador base se fundamenta en la hipótesis de que la base exportadora representa el verdadero motor económico, mientras que la base local se desarrolla de acuerdo a la evolución de la primera.

Vamos a concretar estas ideas de la siguiente forma: suponemos que la base exportadora de una región genera una renta X (variable exógena), y que una parte constante de esta renta α se gasta localmente. Este gasto genera nuevos rendimientos αX , de los que de nuevo una parte α se vuelve a gastar localmente, y así sucesivamente, con lo que la renta Y de la región se puede expresar a partir del multiplicador α como:

$$Y = X + \alpha X + \alpha^2 X + \dots = \frac{1}{1-\alpha} X \quad (1.1)$$

Una extensión de este sencillo modelo (Pred, 1966) consiste en considerar que el ratio de la renta que se gasta localmente no es constante, sino que varía con el tamaño del mercado local. Una razón de esta dependencia podría ser que un mercado local suficientemente grande puede soportar una industria local económicamente eficiente. Siguiendo a Fujita *et al* (1999) concretamos esta hipótesis introduciendo la siguiente ecuación para el multiplicador α :

$$\alpha_t = \min[\gamma Y_t, \bar{\alpha}] \quad \bar{\alpha} > 0,5 \quad (1.2)$$

La última ecuación impone en el modelo dos dinámicas para la renta: una dinámica no lineal con un multiplicador creciente con la renta y una dinámica lineal con un multiplicador constante. Este modelo introduce el concepto de *bifurcaciones* o puntos de cambio cualitativos en el comportamiento del sistema (ver Figura 5).

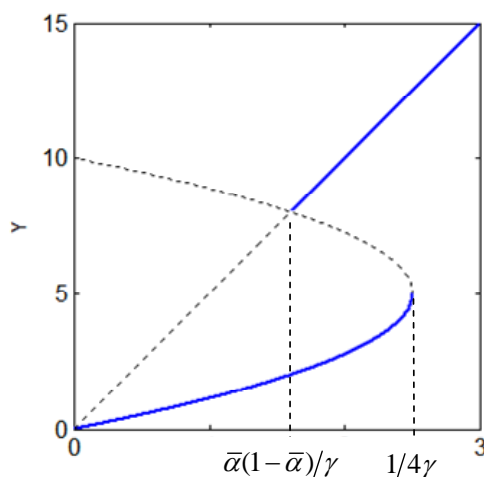


Figura 5. Gráfico de estados de equilibrio del modelo del multiplicador base para $(\gamma = 0,1; \bar{\alpha} = 0,8)$.

Las líneas continuas representan el conjunto de estados de equilibrio posibles dada la ecuación del multiplicador Ec.(1.2). El modelo presenta tres zonas diferenciadas: un rango inferior $[0, \bar{\alpha}(1-\bar{\alpha})/\gamma)$ con una dinámica de la renta no lineal que responde a un proceso acumulativo creciente $Y = X/(1-\gamma Y)$; un rango superior $(1/4\gamma, \infty)$ que responde a una dinámica lineal $Y = X/(1-\bar{\alpha}Y)$; y el correspondiente rango intermedio, donde son posibles ambas dinámicas dependiendo de la situación de partida. La gráfica nos muestra dos claras bifurcaciones que se corresponden a los puntos de interrupción de las curvas. El comportamiento del sistema es diferente si partimos de una situación inicial de renta pequeña o de renta elevada.

Las bifurcaciones están presentes en las ecuaciones de los modelos de la Nueva Geografía Económica que describiremos en los apartados próximos. La idea fundamental es que el sistema económico presenta rangos de los valores de los parámetros donde son posibles comportamientos diferentes y que dependiendo de cuál sea el punto de partida el sistema se comportará de una determinada forma. Esta característica de dependencia de las condiciones iniciales nos recuerda el concepto evolucionista de *dependencia histórica* que veremos con detalle en el próximo capítulo.

1.1.2 Teoría de comercio, teoría de crecimiento y Nueva Geografía Económica

La Nueva Geografía Económica recupera para sí algunos de los conceptos anteriores, aunque propone un nuevo modelo analítico con el que poder explicarlos. El corazón matemático de este modelo es una vieja aproximación a la competencia monopolística propuesta por Dixit y Stiglitz (1977), que explicaremos después,

recuperada posteriormente por la nueva teoría económica sobre el comercio y el crecimiento (Barro & Martin, 1995).

El modelo clásico de competencia perfecta y rendimientos constantes presenta grandes dificultades a la hora de explicar los fenómenos económicos reales –especialmente el crecimiento económico y la disparidad en la distribución de las actividades económicas entre regiones y países–, pues el mundo real se obstina por mostrar imperfecciones en los mercados y rendimientos crecientes. No nos sorprende entonces, que los intentos por superar las limitaciones de la aproximación clásica hayan dado origen a teorías sobre el comercio, el crecimiento y la economía espacial que comparten en muchos casos un tronco común (Brakman & Heijdra, 2004).

Por ejemplo, en el área de la teoría de comercio, Krugman (1979) ofrece una explicación alternativa al tradicional modelo de ventaja competitiva de Hecksher-Ohlin, mediante un modelo de competencia monopolística que explica los fenómenos de especialización en las naciones a partir de las economías de escala a nivel de empresa y el comercio internacional. Y si revisamos la nueva teoría de crecimiento (Barro & Martin, 1995), vemos como el mismo marco analítico del modelo de competencia monopolística ha dado origen a nuevos modelos como el de crecimiento endógeno propuesto por Romer (1990).

El mecanismo acumulativo que está presente en muchos de estos modelos de comercio y de crecimiento también permite explicar genuinos fenómenos de aglomeración como los estudiados por la Geografía Económica. No nos ha de extrañar por tanto, que el origen de la Nueva Geografía Económica provenga de autores que hayan dado el salto desde estas áreas de conocimiento a los problemas de economía espacial¹¹.

¹¹ Por ejemplo, los orígenes de uno de los economistas considerados como padre de la nueva Geografía Económica, Paul Krugman, se encuentran en la teoría de comercio y crecimiento en la que se enmarcan sus primeras publicaciones.

1.2 El modelo de competencia monopolística de Dixit-Stiglitz

El modelo de competencia monopolística (CM)¹² propuesto por Dixit y Stiglitz (1977) representa un intento por superar las limitaciones del modelo económico clásico sin perder capacidad de análisis matemático. Vamos a ver que embebido en el propio modelo aparece un interesante *efecto índice de precios* que es uno de los causantes de la dinámica acumulativa presente en las aportaciones posteriores de Fujita, Krugman y Venables (1999).

Las posibilidades que ofrece un modelo de este tipo para superar algunas de las limitaciones del modelo clásico han hecho que forme parte inseparable de la Nueva Geografía Económica, y antes que ella, de las nuevas teorías económicas sobre comercio internacional y crecimiento (Brakman & Heijdra, 2004).

1.2.1 Limitaciones del modelo de competencia perfecta

El modelo de competencia perfecta contiene hipótesis clave sobre el mercado y el comportamiento de los agentes económicos que, si bien facilitan obtener una solución analítica, limitan su capacidad para explicar fenómenos económicos complejos como los que preocupan a la Geografía Económica. Starrett (1978) demuestra que un modelo constituido por agentes que operan bajo rendimientos constantes de escala y que se mueven en un espacio homogéneo, no puede explicar por sí mismo procesos de concentración espacial.

En el mundo real observamos empresas que disfrutan de economías de escala no contempladas por el modelo clásico, para el que no es posible que una gran empresa pueda beneficiarse de su tamaño para echar fuera del mercado a los pequeños competidores. Sin embargo, la evidencia de que muchas empresas tienden a concentrar sus actividades en unos pocos lugares (Krugman, 1993) pone de manifiesto que la escala a la que trabajan las empresas tiene que jugar un papel importante.

El modelo de competencia monopolística de Dixit-Stiglitz (1977) permite suavizar algunas de las hipótesis del modelo clásico, como la ausencia de economías de

¹² Utilizaremos a partir de aquí las siglas CM para referirnos al modelo de competencia monopolística.

escala, sin perder otras propiedades bastante deseables. De esta forma mantienen la idea de competencia perfecta, traducida en el modelo en que cada empresa no puede influir con sus decisiones en el precio del resto de los productos, lo que permite dejar a un lado consideraciones estratégicas sobre el comportamiento de los agentes que dificultan la obtención de resultados analíticos.

1.2.2 Descripción del modelo

La idea central para comprender este modelo reside en sustituir la hipótesis del modelo clásico de competencia perfecta de un producto homogéneo entre diferentes empresas, por una competencia entre productos cuasi-sustitutivos, donde cada variedad de producto es monopolio de una única empresa que aprovecha sus economías de escala para dejar fuera al resto de posibles competidores en esa variedad.

Naturalmente, el monopolio está condicionado por el hecho de que los consumidores distinguen imperfectamente entre las diferentes variedades, por lo que como veremos, el poder de mercado de cada empresa depende de un parámetro fundamental del modelo que es la elasticidad de sustitución entre variedades σ .

$$\frac{\partial q(i)}{\partial p(j)} \left(\frac{p(j)}{q(i)} \right) = \sigma = cte \quad \forall i, j \quad i \neq j \quad (1.3)^{13}$$

Comportamiento de los consumidores

El comportamiento de los consumidores se describe a partir de una utilidad agregada, definida mediante una *función de elasticidad de sustitución constante* (CES^{14}) de todas las variedades de productos¹⁵:

¹³ Si bien encontramos en la literatura sobre nueva Geografía Económica diferentes convenios para expresar las ecuaciones económicas, nosotros utilizaremos el siguiente por ser el menos confuso: la cantidad de producto de la variedad i -ésima se representa como $q(i)$; cuando sea necesario mencionar el origen o región de una magnitud, entonces utilizaremos un subíndice.

¹⁴ Constant Elasticity of Substitution.

¹⁵ La versión espacial del modelo de competencia monopolística propuesto inicialmente por Krugman (1991) contempla una función de elasticidad constante de variedades de productos manufacturados en una industria frente a un producto agrícola homogéneo. Por esta razón utilizaremos el subíndice f en la formulación para cuando una variable tenga relación con el sector industrial, como es el caso de la utilidad U_f y del número de variedades n_f de la Ec.(1.4).

$$U_f = \left(\sum_{i=1}^{n_f} q(i)^\theta \right)^{1/\theta} = \left(\sum_{i=1}^{n_f} q(i) \frac{\sigma-1}{\sigma} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad \sigma > 1 \quad (1.4)$$

La elasticidad de sustitución varía entre dos extremos: un conjunto de productos muy diferenciados ($\sigma = 1$) y un conjunto de productos sustitutos perfectos ($\sigma \rightarrow \infty$).

La elección del consumidor se describe como un problema de maximización de la función de utilidad anterior, conocidos los precios de los productos y la renta Y :

$$\max U_f \quad s.a. \quad Y = \sum_{i=1}^{n_f} q(i)p(i) \quad (1.5)$$

Este problema de maximización se resuelve en dos etapas (Fujita *et al*, 1999): en primer lugar minimizando el coste de poseer un conjunto de variedades para cualquiera que sea la utilidad U_f , lo que nos permite definir una nueva variable que llamamos *índice de precios*:

$$P_f^{1-\sigma} = \sum_{i=1}^{n_f} p(i)^{1-\sigma} \quad (1.6)$$

En segundo lugar, maximizando la utilidad U_f teniendo en cuenta la restricción presupuestaria, lo que finalmente nos proporciona las curvas de demanda de cada variedad:

$$\begin{aligned} q(i) &= \phi p(i)^{-\sigma} \\ \phi &= Y P_f^{\sigma-1} \end{aligned} \quad (1.7)$$

Aquí se hace una importante suposición y es que el número de variedades es lo suficientemente grande como para que la decisión individual de una empresa no afecte significativamente al índice de precios P_f . Bajo esta hipótesis, cada empresa monopolista en una variedad acepta como dado el índice de precios y se enfrenta a una curva de demanda de elasticidad conocida (la elasticidad de sustitución σ) y sin tener que introducir formulaciones estratégicas en la decisión sobre el precio y la cantidad a fabricar.

Comportamiento de los productores

El modelo se completa con unas empresas que se enfrentan a unos costes fijos de entrada y a unos costes variables por unidad fabricada. Esto describe un escenario con economías de escala, con costes medios decrecientes con la cantidad total producida. La conducta del productor óptima se obtiene cuando se igualan los costes marginales con los ingresos marginales. Teniendo en cuenta la curva de demanda anterior, Ec.(1.7):

$$cm(i) = im(i) = p(i) \left(1 - \frac{1}{\sigma}\right) = p(i)\theta \quad (1.8)$$

Es decir, que la conducta de la empresa en el modelo de CM propuesto establece un precio óptimo igual a un margen $1/\theta$ sobre los costes marginales que depende de la elasticidad de sustitución.

1.2.3 El efecto del número de variedades

Resulta interesante comentar el efecto que produce en los precios un aumento del número de variedades, que es resultado de la preferencia por la variedad con la que se ha definido la conducta de los consumidores en la Ec.(1.4). Suponiendo que todas las variedades se venden a un mismo precio p , la utilidad U_f y el índice de precios P_f se pueden expresar ahora como:

$$U_f = \left(\frac{Y}{p}\right) n_f^{\frac{1}{\sigma-1}} \quad (1.9)$$

$$P_f = p n_f^{\frac{1}{1-\sigma}} \quad (1.10)$$

Un aumento en el número de variedades conlleva: un aumento en la utilidad de los consumidores, quienes ven con agrado disponer de una mayor variedad donde elegir; y una disminución del índice de precios, puesto que ahora un mayor número de empresas compiten por la misma renta. La importancia de este efecto depende de la elasticidad de sustitución. Cuanto más pequeño es sigma y los productos son más diferenciados mayores son las consecuencias descritas en la utilidad y el índice de precios.

Veremos más adelante que esta característica matemática de las ecuaciones propuestas en el modelo de CM está estrechamente relacionada con la dinámica acumulativa del modelo de Núcleo y Periferia, que es el germen de la mayoría de los modelos de geografía económica. Si imaginamos dos regiones con economías descritas por un modelo de CM, las personas tendrán una preferencia a vivir en aquella región con mayor variedad de productos, lo que permite generar un claro proceso de aglomeración.

1.3 El modelo de Núcleo-Periferia

El mundo económico ideal del modelo de CM descrito en el apartado anterior carece de cualquier dimensión espacial. En cambio, el modelo de Núcleo y Periferia introducido por Krugman (1991) sí la tiene. Este modelo puede describirse como una versión espacial del modelo de CM: un mundo ideal de Dixit-Stiglitz caracterizado por la existencia de regiones que comercian entre sí.

Vamos a ver que este modelo permite explicar los fenómenos de aglomeración mediante un proceso endógeno que se fundamenta en las economías de escala de las empresas, la movilidad de la mano de obra industrial, y los costes de transporte que representan las barreras al comercio interregional. En el apartado sobre extensiones veremos otra aproximación muy semejante basada en las vinculaciones entre empresas (Venables, 1996), que permite resolver escenarios internacionales donde los movimientos migratorios están limitados.

1.3.1 Bases del Modelo¹⁶

Imaginemos una economía compuesta por *dos regiones*¹⁷, en las que desarrollan su actividad económica *dos sectores* de naturaleza muy diferente:

1. Un sector agrícola, igualmente repartido entre las dos regiones, que produce un producto homogéneo, opera con rendimientos constantes de escala y dispone de una mano de obra estable en cada región¹⁸.

¹⁶ El modelo Núcleo-Periferia propuesto por Krugman (1991) se encuentra explicado y comentado brillantemente en Neary (2001).

¹⁷ Este modelo bi-regional puede generalizarse sin mucha dificultad para el caso multirregional (Fujita *et al.*, 1999).

2. Un sector industrial que fabrica una variedad de productos manufacturados, imperfectamente diferenciados por los consumidores cuyo comportamiento se describe mediante la aproximación de CM de Dixit-Stiglitz.

Comportamiento de los consumidores

Ahora, la función de utilidad agregada de los consumidores se expresa mediante una función *Cobb-Douglas* del producto agrícola A y la variedad de productos manufacturados en la industria, expresada ésta última por la sub-función de utilidad de elasticidad de sustitución constante ya vista en la Ec.(1.4).

$$U = A^{1-\mu} U_f^\mu \quad (1.11)$$

Todas las relaciones demostradas anteriormente para el modelo de CM continúan siendo válidas, aunque teniendo en cuenta que sólo la parte μ de la renta total Y de los consumidores se emplea en las variedades industriales:

- El índice de precios, que ahora representa un índice de precios industriales, es idéntico a la Ec.(1.6).
- Las curvas de demanda de cada variedad son similares a la Ec.(1.7). Se vuelven a expresar en la Ec.(1.12), donde hemos eliminado la referencia a la variedad puesto que, como veremos en el siguiente apartado, al ser el precio igual para todas las variedades la función de demanda es idéntica para todas ellas.

$$q = \phi p^{-\sigma} = (\mu Y P_f^{\sigma-1}) p^{-\sigma} \quad (1.12)$$

¹⁸ Este sector residual repartido por igual entre las dos regiones y estable frente a movimientos migratorios constituye la base de la fuerza centrífuga del modelo de Núcleo y Periferia. Como más tarde se probará analíticamente, en la medida en que los costes de transporte son suficientemente altos resulta económicamente rentable una industria repartida entre las dos regiones que satisface las correspondientes demandas locales.

Comportamiento de los productores

Cada empresa utiliza una función de producción¹⁹ con un único factor de producción que es la mano de obra $l(i)$:

$$l(i) = F + cq(i) \quad (1.13)$$

Suponiendo que los costes salariales son w , la empresa ha de sufragar unos costes fijos de entrada Fw y unos costes variables por unidad de producción cw que definen un escenario de economías de escala para las operaciones de la compañía.

$$C(i) = (F + cq(i))w \quad (1.14)$$

Ya hemos visto en la Ec.(1.8) que bajo estas hipótesis, una empresa maximiza los beneficios fijando un precio óptimo como un margen $1/\theta$ sobre los costes marginales. En el modelo que estamos describiendo, esto supone que el precio óptimo de todas las variedades es el mismo p^* y dependiente principalmente de la elasticidad de sustitución:

$$\frac{\sigma-1}{\sigma} p(i) = cw \Rightarrow p(i)^* = p^* = \left(\frac{\sigma}{\sigma-1} \right) cw \quad (1.15)$$

Como en muchas otras aproximaciones económicas, se impone además libre entrada y salida de empresas, lo que evita complicar los resultados analíticos al no tener que considerar cómo las empresas invierten sus beneficios. La suposición de beneficio económico cero nos determina la cantidad óptima que cada empresa fabrica, que al igual que ocurre con el precio, resulta la misma para todas las variedades.

$$\pi(i) = p^* q(i) - (F + cq(i))w = 0 \Rightarrow q(i)^* = q^* = (\sigma-1) \frac{F}{c} \quad (1.16)$$

Observando la ecuación anterior nos damos cuenta de un importante artificio matemático del modelo: la cantidad de equilibrio que cada empresa fabrica depende

¹⁹ El modelo se construye bajo la hipótesis de que todas las empresas de la industria comparten la misma tecnología y son idénticas en los costes fijos de entrada y variables por unidad fabricada a los que se enfrentan.

exclusivamente de sus costes fijos de entrada F , los costes variables c y de la elasticidad de sustitución.

¿Qué ocurre entonces cuando modificamos la cantidad de mano de obra? Teniendo en cuenta la Ec.(1.13), en la situación de equilibrio la mano de obra que demanda la industria será:

$$L = \sum_{i=1}^{n_f} (F + cq^*) = n_f^* \sigma F \quad (1.17)$$

Lo que nos permite expresar el número de variedades n_f , que equivale al número de empresas²⁰ como:

$$n_f^* = \frac{L}{\sigma F} \quad (1.18)$$

Cualquier incremento en la cantidad de mano de obra L no afecta a la cantidad de producto que fabrica cada empresa y se compensa en el modelo con un incremento del número de variedades producidas en la industria.

Este es otro artefacto matemático del modelo de CM que puede no encontrar su equivalencia en el mundo real. Para el modelo de Dixit-Stiglitz, un incremento en el mercado no incrementa la cantidad que fabrican las empresas sino que introduce nuevas variedades. Sin embargo el comportamiento real de las empresas suele ser diferente; la apertura de mercados, por ejemplo, suele venir acompañada por una mayor competencia y un incremento de la escala a la que trabajan las empresas.

Comercio interregional y costes de transporte

A partir de ahora introduciremos una dimensión espacial en el modelo, al hacer referencia a cada una de las regiones en las que se desarrollan las actividades de los dos

²⁰ Recordar que una empresa disfruta de economías de escala, por lo que cualquier otra nueva empresa que quiera entrar en el mercado lo hará fabricando una variedad distinta.

sectores ya descritos²¹. Las hipótesis del modelo de Núcleo y Periferia propuesto por Krugman (1991) establecen que:

- Los consumidores de ambas regiones manifiestan las mismas preferencias.
- Las empresas utilizan la misma tecnología e idéntica función de producción.
- Existe libre comercio para todos los productos, aunque las variedades industriales incurren en unos costes de transporte que explicaremos a continuación.

Se hace una aproximación *iceberg* de los costes de transporte, que considera que únicamente una fracción I/T llega al destino por cada unidad inicialmente enviada. Esto se traduce en una variación tanto en la cantidad que realmente importa una región como su precio de venta, como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. Aproximación iceberg de los costes de transporte.

	Origen	Destino
Unidades	T	I
Precio unitario	p	pT

En esta nueva economía abierta al comercio entre las dos regiones, los consumidores podrán elegir entre una mayor variedad de productos industriales, en concreto entre n_{f1} variedades de la región I y n_{f2} variedades de la región 2. El índice de precios industriales será diferente para cada región, al tener en cuenta el coste en el que incurren las importaciones (ver Tabla 1). Así, si miramos a la región I , el índice de precios contemplará las n_{f1} variedades locales a un precio p_1 y las n_{f2} importadas a un precio Tp_2 .

$$P_{f1}^{1-\sigma} = n_{f1}p_1^{1-\sigma} + n_{f2}(p_2T)^{1-\sigma} \tag{1.19}$$

La expresión para la región 2 es similar. A partir de ahora los subíndices harán referencia a la región a la que pertenezca la magnitud.

²¹ Las ecuaciones obtenidas en los apartados anteriores son válidas para cada región, y por ello no hemos considerado oportuno complicar en exceso la notación empleada añadiendo subíndices para distinguir las regiones. Emplearemos estos subíndices cuando sea necesario hacer mención explícita de que una magnitud pertenece al dominio particular de una región.

Las curvas de demanda de cada variedad también difieren en cada región, al tener en cuenta las exportaciones de productos que incurren en costes de transporte iceberg. Una empresa situada en la región 1 verá una demanda compuesta por la demanda local más la demanda exterior. Como han de fabricarse T unidades por cada unidad demandada en la región 2, la Ec.(1.12) para la región 1 queda ahora de la siguiente forma:

$$q_1 = \phi_1 p_1^{-\sigma} = \mu \left(Y_1 P_{f1}^{\sigma-1} + Y_2 P_{f2}^{\sigma-1} T^{1-\sigma} \right) p_1^{-\sigma} \quad (1.20)$$

Con independencia de dónde se encuentren los consumidores, las empresas se enfrentan a una curva de demanda de elasticidad constante igual a la elasticidad de sustitución. Esta característica del modelo de Núcleo y Periferia simplifica notablemente los resultados analíticos.

1.3.2 Efecto índice de precios

Vamos a estudiar los efectos que introducen los costes de transporte iceberg propuestos en el modelo de Núcleo y Periferia. Volviendo a expresar la Ec.(1.19) para las dos regiones tenemos que:

$$\begin{aligned} P_{f1}^{1-\sigma} &= n_{f1} p_1^{1-\sigma} + n_{f2} (p_2 T)^{1-\sigma} \\ P_{f2}^{1-\sigma} &= n_{f1} (p_1 T)^{1-\sigma} + n_{f2} p_2^{1-\sigma} \end{aligned} \quad (1.21)$$

Parece evidente que existe una solución de equilibrio que ha de ser simétrica²² y que ha de satisfacer la siguiente expresión:

$$P_f^{1-\sigma} = n_f p^{1-\sigma} (1 + T^{1-\sigma}) \quad (1.22)$$

Podemos linealizar el sistema en torno a esta solución simétrica, y estudiar una pequeña variación en torno a esta solución. La naturaleza simétrica del sistema hace que un aumento de una magnitud de una región esté asociado a una variación de signo

²² Esta simetría en las ecuaciones está presente en todo el modelo de Núcleo y Periferia, así como el procedimiento de estudiar el comportamiento del sistema linealizando en torno al equilibrio simétrico: $P_{f1} = P_{f2}$, $n_{f1} = n_{f2}$, etc.

opuesto en la misma magnitud de la otra región. Teniendo esto en cuenta, podemos diferenciar la Ec.(1.21) obteniendo:

$$\frac{dP_f}{P_f} = -\left(\frac{Z}{\sigma-1}\right)\frac{dn_f}{n_f} + Z\frac{dp}{p} \quad (1.23)$$

donde se ha definido un nuevo coeficiente Z que representa un índice de coste de transporte. Este índice varía siempre entre 0 y 1 ($T \geq 1$), cuanto mayor es el coste de transporte mayor es el valor de Z :

$$Z = \frac{1-T^{1-\sigma}}{1+T^{1-\sigma}} \quad (1.24)$$

La Ec.(1.23) resume el llamado *efecto índice de precios* que consiste en que el coste de vida, medido por el índice de precios, es menor en aquella región que posee un mercado local mayor. Este efecto era esperable ya que todas las variedades producidas localmente no incurren en gastos de transporte, lo que reduce el precio compuesto de los productos industriales en esa región.

1.3.3 Efecto mercado local

De forma análoga a cómo hemos operado en el apartado anterior podemos linealizar las ecuaciones que describen la demanda de una variedad, Ec.(1.20), en torno a la solución simétrica que poseen:

$$\frac{dq}{q} = Z\left(\frac{dY}{Y} + (\sigma-1)\frac{dP_f}{P_f}\right) - \sigma\frac{dp}{p} \quad (1.25)$$

Recordemos el artificio matemático que introducía el modelo de CM, y que comentamos cuando describíamos el comportamiento del productor: una variación de la renta determina un cambio en el número de variedades industriales sin que el precio y la cantidad de cada producto se vean afectados. Considerando en la ecuación anterior que el precio p y la cantidad q no varían, un incremento en la renta debe ser compensado por una disminución en el índice de precios:

$$\frac{dY}{Y} + (\sigma-1)\frac{dP_f}{P_f} = 0 \quad (1.26)$$

y teniendo en cuenta la Ec.(1.23) obtenemos:

$$\frac{dn_f}{n_f} = \left(\frac{1}{Z} \right) \frac{dY}{Y} \quad (1.27)$$

Esta ecuación resume el *efecto mercado local* (Krugman, 1980) que consiste en que aquella región que posee un mayor mercado local (mayor renta Y) tiene una industria proporcionalmente mayor (mayor número de variedades n_f), ya que $Z < 1$.

Veremos más adelante que el efecto mercado local y el efecto índice de precios constituyen la base del mecanismo de aglomeración que está presente en la mayor parte de los modelos de Geografía Económica.

1.3.4 Movilidad de la mano de obra industrial

Los efectos índice de precios y mercado local expresan las razones por las que la actividad industrial podría estar concentrada en una de las regiones, en detrimento de la otra, dando origen a una típica estructura espacial de Núcleo-Periferia. Sin embargo, nada se ha dicho hasta ahora sobre cómo se genera este fenómeno de aglomeración, es decir, sobre las fuerzas de aglomeración presentes en el modelo.

Una primera aproximación a estas fuerzas se resume en la movilidad interregional del factor mano de obra (Krugman, 1991). Veremos otra aproximación en la sección sobre extensiones del modelo de Krugman que se centra en las vinculaciones entre empresas (Venables, 1996; Krugman & Venables, 1996).

El modelo de Núcleo y Periferia impone la hipótesis de que en el sector agrícola se emplea una mano de obra poco especializada igualmente repartida entre las dos regiones. Esta fuerza laboral no se mueve al carecer de incentivos para ello, puesto que al no considerar costes de transporte en este sector el precio del producto agrícola es el mismo en las dos regiones, igual que los salarios de los trabajadores.

Por el contrario, en el sector industrial la mano de obra especializada sí puede moverse entre las dos regiones, y consideraremos que lo hace con el objetivo de obtener mejores salarios reales. Los salarios reales se calculan como la relación entre el salario nominal y el índice de precios de la región, que será un índice compuesto entre el

índice de precios industriales y el precio del producto agrícola. La normalización de precios agrícolas igual a la unidad hace que tengamos unos salarios reales:

$$\omega_r = \frac{w_r}{P_{fr}^\mu P_A^{1-\mu}} = \frac{w_r}{P_{fr}^\mu} \quad r = 1, 2 \quad (1.28)$$

La dinámica *ad-hoc* que impone Kurgman en el modelo se resume de la siguiente forma: una situación inicial donde existen desigualdades salariales entre las regiones alimenta un proceso migratorio que tiende a igualar los salarios reales.

La distribución de la mano de obra industrial entre las dos regiones posee claramente dos extremos: cuando la industria se concentra en una de las regiones y cuando la industria se reparte por igual entre las dos²³. El primero de los casos describe un estado de aglomeración con un patrón *Núcleo-Periferia*, mientras que el segundo describe un estado de una industria simétricamente diversificada.

Diremos que un estado es *estable* si los trabajadores no tienen incentivos para cambiar de región; en caso contrario estaremos ante un estado inestable²⁴. Bajo las premisas anteriores, Krugman analiza la estabilidad de las diferentes soluciones de equilibrio del modelo para diferentes valores del parámetro coste de transporte T .

La cuestión fundamental en este análisis, así como en otros semejantes que encontramos en los modelos de Geografía Económica, es que el observador centra su atención en estudiar la naturaleza del equilibrio de una solución, dejando a un lado el recorrido que ha de hacer el sistema hasta llegar a la misma.

Aunque no hayamos mencionado la empresa, debemos recordar que el modelo de CM en general y el de Núcleo-Periferia en particular reaccionan ante cambios en la mano de obra con cambios en el número de empresas, Ec.(1.18). Podríamos preguntarnos entonces qué se produce antes: si primero se ajusta el mercado laboral, en respuesta a mejores salarios, y después las empresas o viceversa.

²³ Siempre y cuando el sector agrícola esté igualmente repartido entre las dos regiones.

²⁴ Esta definición es idéntica a decir que una empresa no tiene incentivos para cambiar de región (estable) o sí tiene incentivos para hacerlo (inestable). Desde el punto de vista de la empresa los incentivos se miden en la posibilidad de obtener mayores beneficios cambiando de región.

Esto permite utilizar dos aproximaciones que proporcionan los mismos resultados para analizar el equilibrio de una solución (Puga, 1999): asumir que las empresas están siempre en equilibrio y que los trabajadores se mueven persiguiendo obtener mayores salarios reales; o asumir que el mercado laboral está siempre en equilibrio y que son las empresas las que se mueven ante la posibilidad de obtener beneficios (Neary, 2001).

La primera aproximación es la utilizada por Krugman, quien analiza un estado de equilibrio preguntándose cómo se vería afectado si un trabajador decidiera cambiar de región²⁵. Sin embargo, la segunda aproximación que emplearemos a partir de ahora, nos resulta más didáctica al poner nuestra atención en la empresa, y analizar un estado de equilibrio preguntándonos qué pasaría si una empresa decidiera cambiar de región²⁶.

Vamos a seguir la descripción de Neary (2001) por ser a nuestro juicio la que mejor aclara la dinámica acumulativa del modelo de Núcleo y Periferia. Supongamos que nos encontramos ante un estado de equilibrio con la industria simétricamente repartida entre las dos regiones, y nos planteamos qué ocurre cuando una empresa decide abandonar la región 2 para ubicarse en la región 1. Si tras este análisis llegamos a la conclusión de que en la nueva situación la empresa obtiene mayores beneficios, diremos que el estado de diversificación inicial es inestable puesto que existirá un incentivo en otras empresas de la región 2 para moverse a la región 1.

La Figura 6 recoge la situación de equilibrio que percibe una empresa de la región 1. Como ya hemos visto, la empresa maximiza los beneficios igualando los ingresos marginales a los costes marginales. Mientras que la condición de libre entrada y salida de empresas nos determina que la escala a la que opera la compañía es aquella en que iguala sus costes medios al precio.

²⁵ Esta aproximación se traduce en las ecuaciones diferenciales del modelo como que $dq/q=0$.

²⁶ Esta otra aproximación que empleamos en nuestros resultados se traduce en las ecuaciones diferenciales como $dw/w=0$.

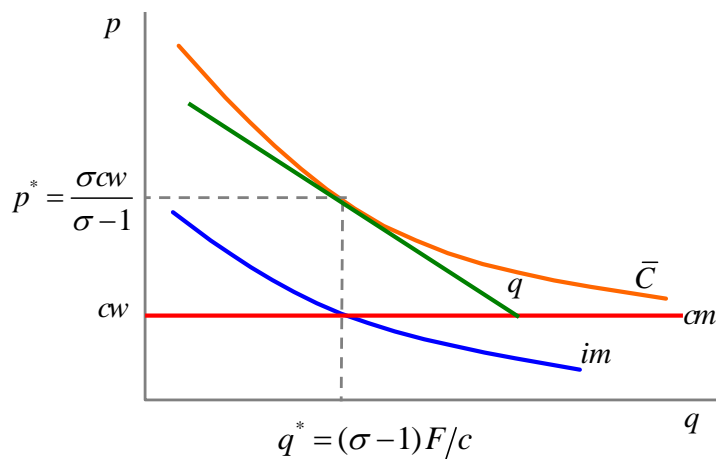


Figura 6. Situación de equilibrio para una empresa en el modelo de núcleo-periferia.

Curva de demanda (q), curva de costes medios (\bar{C}), costes marginales (cm) e ingresos marginales (im).

A partir de esta gráfica podemos explicar los efectos que la entrada de una nueva empresa provoca.

Efecto índice de precios (fuerza centrífuga)

Debido al conocido efecto índice de precios la aparición en el mercado de una nueva variedad provoca un desplazamiento de las demandas de cada variedad hacia abajo, y por consiguiente de los ingresos marginales (ver Figura 7). Este incremento de competitividad reduce el beneficio de las empresas por lo que el sistema tiende a volver a la situación inicial de diversificación industrial.

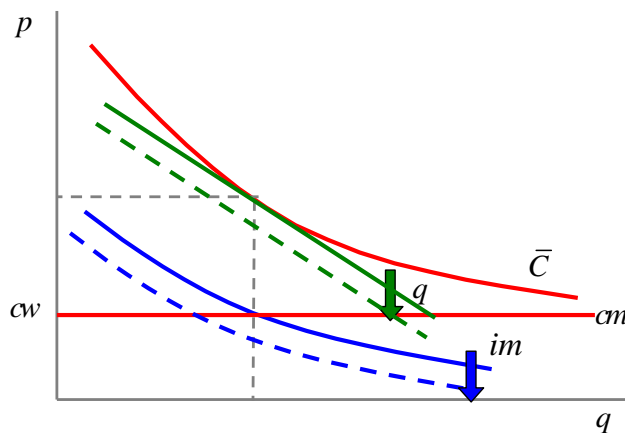


Figura 7. Entrada de una nueva empresa y efecto índice de precios.

Las curvas de demanda (q) e ingresos marginales (im) se desplazan hacia abajo. La reducción de beneficios tiende a volver a la situación inicial.

Vinculaciones regresivas (fuerza centrípeta)

El incremento en el número de empresas en la región 1 conlleva una situación transitoria de escasez de mano de obra que tiende a subir los salarios reales, y consecuentemente genera un efecto llamada a los trabajadores de la región 2 que migran a la 1. Estos nuevos trabajadores incrementan la demanda local que tiene un efecto opuesto al anterior al incrementar los beneficios de las empresas y por tanto incentivar la entrada de nuevas compañías.

Si observamos la Figura 7, ahora el movimiento de las curvas de demanda y de ingresos marginales es hacia arriba, con el consiguiente aumento del beneficio empresarial. A este mecanismo de concentración de empresas provocado por un incremento en la demanda local se le llama *vinculación regresiva* o vinculación de la demanda.

No resulta complicado evaluar cómo es el equilibrio entre estos dos efectos opuestos, y cuándo predominará uno de ellos sobre el otro. Para ello debemos volver nuestra atención de nuevo sobre la Ec.(1.25) que nos expresa la dinámica de la demanda. Suponemos que por el momento los salarios netos no se modifican. De la Ec.(1.15) sabemos entonces que el precio de las variedades tampoco cambia, con lo que la ecuación de dinámica de la demanda queda como:

$$\frac{dq}{q} = Z \left(\frac{dY}{Y} + (\sigma - 1) \frac{dP_f}{P_f} \right) = Z \left(\frac{dq}{q} \right)_{\substack{\text{Vincul.} \\ \text{Demanda}}} + Z \left(\frac{dq}{q} \right)_{\substack{\text{Efecto} \\ \text{Precios}}} \quad (1.29)$$

Los dos términos dentro del paréntesis representan la vinculación de demanda y el efecto índice de precios, respectivamente. Teniendo en cuenta la Ec.(1.23), el efecto del índice de precios es:

$$\left(\frac{dq}{q} \right)_{\substack{\text{Efecto} \\ \text{Precios}}} = (\sigma - 1) \frac{dP_f}{P_f} = -Z \frac{dn}{n} \quad (1.30)$$

La renta de una región será la suma de las rentas producidas por la industria y las rentas agrarias, Ec.(1.31), donde L_A representa a los agricultores. El modelo de Núcleo y Periferia se suele normalizar utilizando como numerario los salarios agrícolas, que bajo las hipótesis de rendimientos constantes de escala y de no haber costes de transportes agrícolas permanecen constantes e iguales en las dos regiones.

$$Y = wL + w_A L_A = wL + L_A \quad (1.31)$$

Con un sector agrícola invariable con salarios constantes podemos diferenciar la expresión anterior en torno a la solución simétrica, obteniendo que la variación de la renta de la región es:

$$\frac{dY}{Y} = \mu \left(\frac{dL}{L} + \frac{dw}{w} \right) \quad (1.32)$$

Bajo el supuesto de que los salarios netos no varían ($dw/w = 0$) y teniendo en cuenta la Ec.(1.18), entonces la vinculación de la demanda se reduce a:

$$\left(\frac{dq}{q} \right)_{\substack{\text{Vinc.} \\ \text{Demanda}}} = \mu \frac{dL}{L} = \mu \frac{dn}{n} \quad (1.33)$$

Observando las Ec.(1.30) y Ec.(1.33) se concluye que el equilibrio entre ambos efectos va a depender de la importancia relativa de la industria con respecto a la agricultura μ y del índice de costes de transporte Z :

- Cuanto mayor es μ , mayor es el efecto de las vinculaciones de la demanda y su fuerza centrípeta que tiende a romper el equilibrio inicial de una industria diversificada.
- Cuanto mayor es Z , y por tanto mayores son los costes de transporte, se refuerza la competitividad entre empresas que tiende a mantener la situación de equilibrio diversificado.

En definitiva, el equilibrio de una industria repartida entre las dos regiones para el modelo de Núcleo y Periferia es estable siempre que $\mu < Z$.

Vinculaciones progresivas (fuerza centrípeta)

El último efecto es un poco más sutil, y viene a reforzar más la tendencia a la aglomeración. Sabemos que el índice de precios de la región 1 disminuye con la entrada de la nueva empresa. Esto trae consigo también un efecto llamada en los trabajadores de la región 2 puesto que el coste de vida en la primera es menor y por tanto los salarios reales son mayores, Ec.(1.28).

Como ya hemos visto, la nueva entrada de trabajadores conlleva un aumento del mercado local y por tanto de los beneficios que disfrutaban las empresas, incentivando la entrada de nuevas compañías. El equilibrio en el mercado laboral supone que los salarios netos en la región 1 han de disminuir, hasta igualarse los salarios reales en ambas regiones. Esta caída del precio del factor productivo tiende a incrementar los beneficios de las empresas incentivando la entrada de nuevas firmas. En la Figura 8 la caída en los salarios netos conlleva a que las curvas de coste medio y marginal se desplazan hacia abajo.

Este segundo mecanismo de concentración de empresas provocado por la reducción de los salarios netos en la región se le llama *vinculación progresiva*.

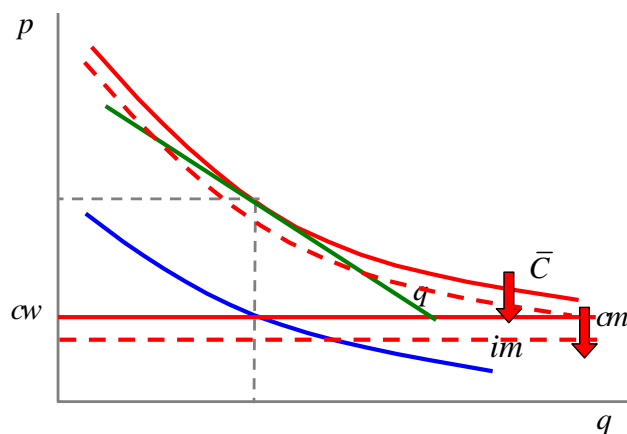


Figura 8. Entrada de una nueva empresa y vinculación progresiva.

Los salarios netos w se reducen y las curvas costes medios (\bar{C}), costes marginales (cm) se desplazan hacia abajo. El aumento de beneficios refuerza el cambio producido en el estado de equilibrio incentivando la entrada de nuevas empresas.

1.3.5 Análisis de los equilibrios del modelo de Núcleo y Periferia

El análisis del equilibrio del modelo de Núcleo y Periferia se concluye estudiando las condiciones que hacen que pasemos de diversificación a concentración y viceversa, cuando partimos de un estado inicialmente estable. El parámetro principal del modelo sobre el cual se construye este análisis es el coste de transporte T .

La no linealidad del sistema de ecuaciones diferenciales del modelo hace que existan valores críticos de los parámetros que separan comportamientos distintos, y que suelen ser llamados *bifurcaciones* del modelo. Para delimitar estas bifurcaciones se definen dos conceptos (Fujita *et al*, 1999) que en principio pudieran parecer idénticos²⁷:

- Partiendo de un estado de equilibrio con una industria simétricamente repartida entre las dos regiones, analizamos su estabilidad. Definimos el *punto de ruptura* como aquél valor del coste de transporte T_B que hace que pasemos de esta situación de simetría estable a una situación inestable, que desencadena un proceso tendente a la aglomeración de la industria.
- Partiendo de un estado de equilibrio con una industria concentrada en una de las regiones (núcleo) definimos el *punto de sostenimiento* como aquel valor del coste de transporte T_S que hace que pasemos de esta situación de asimetría estable a una situación inestable que desencadena un proceso tendente a la diversificación.

Las demostraciones analíticas de los valores de estos puntos se encuentran recogidas como apéndice en el apartado 1.6, pues no resultan necesarias para realizar el análisis del modelo. Para estudiar el comportamiento global del modelo para diferentes valores del coste de transporte T (parámetro exógeno) se define la variable λ como el peso relativo de la industria de la región 1 (donde L_i representa la cantidad de mano de obra industrial de la región correspondiente):

$$\lambda = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \quad (1.34)$$

²⁷ Para diferenciar ambos conceptos, que representan valores críticos que separan zonas de estabilidad y no estabilidad, en el primer caso miramos el intervalo de inestabilidad del equilibrio simétrico identificando al extremo como un valor de ruptura del equilibrio de industria diversificada, mientras que en el segundo caso miramos el intervalo de estabilidad del equilibrio asimétrico identificando el extremo como punto de sostenimiento del equilibrio Núcleo-Periferia.

Una forma de describir el modelo es representar gráficamente cómo varía λ con relación a T . El correspondiente diagrama de la dinámica del modelo de Núcleo y Periferia se recoge en la Figura 9. La línea continua representa estados de equilibrio estables, mientras que la línea de puntos representa los inestables.

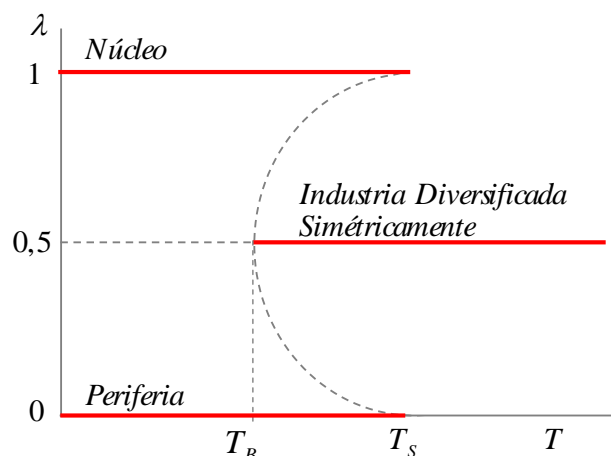


Figura 9. Bifurcación Tomahawk del modelo de Núcleo y Periferia.

Se observa a primera vista una bifurcación característica de los modelos de Geografía Económica, que algunos autores llaman *Tomahawk* (Fujita *et al*, 1999). Existen dos puntos críticos en esta gráfica que se corresponden con los puntos de ruptura y de sostenimiento definidos anteriormente, y que separan el comportamiento del modelo caracterizado por una industria simétricamente diversificada ($\lambda = 1/2$) del opuesto en el que la industria está concentrada en la región 1 ($\lambda = 1$) o en la región 2 ($\lambda = 0$).

Los costes de transporte pueden interpretarse equivalentemente, bien como un limitador de las fuerzas de aglomeración que surgen de las vinculaciones progresivas y regresivas, o también como un potenciador de las fuerzas centrífugas que surgen del efecto índice de precios.

Teniendo en cuenta la última interpretación, la Figura 9 nos enseña que la bifurcación tomahawk se caracteriza porque resulta necesario más impulso centrífugo (T_S) para romper un estado inicial de aglomeración que para mantener (T_B) un estado inicial de industria simétricamente diversificada.

Esta misma idea puede expresarse en términos de condiciones necesarias y/o suficientes (Neary, 2001): que los costes de transporte sean menores al punto T_B es condición suficiente para que el equilibrio núcleo-periferia sea estable, pero no es condición necesaria, pues existen valores de los costes de transporte para los que un equilibrio inicial núcleo-periferia es sostenible ($T_B < T < T_S$). La Tabla 2 resume las propiedades de los puntos críticos del modelo.

Tabla 2. Resumen de las propiedades de los puntos críticos del modelo de Núcleo y Periferia.

Punto	Varía con μ	Varía con σ	Condición
Ruptura T_B	Positivamente	Negativamente	Suficiente
Sostenimiento T_S	Positivamente	Negativamente	Necesaria

El aspecto más relevante del análisis del modelo de Núcleo y Periferia es que existe un intervalo de costes de transporte intermedio (T_B, T_S) donde es posible cualquiera de los equilibrios simétrico y asimétrico, dependiendo de la situación inicial. Es decir, que el equilibrio depende de la evolución historia de la industria en las dos regiones que genera inicialmente uno de los dos posibles estados de equilibrio. Este resultado ofrece un espacio a la actuación e interpretación política en los modelos de Geografía Económica.

1.3.6 Causalidades acumulativas

Como hemos visto en los apartados anteriores, el modelo de Núcleo y Periferia posee una compleja dimensión analítica que puede desviar la atención de los principios en los que sustenta la explicación de los fenómenos de aglomeración. En este apartado, y a modo de resumen, contamos brevemente la historia que narra el modelo, pero dejando a un lado la complejidad de las expresiones matemáticas ya comentadas.

Si buscamos el *origen* de los fenómenos de aglomeración en el modelo, éste se encuentra en la existencia de economías de escala a nivel de empresa. El argumento es bastante sencillo: en la medida en que las barreras de comercio son importantes, cada región puede albergar una industria económicamente eficiente.

Si bien, esto por sí sólo no explica cómo se concentra la industria en una región. Resulta imprescindible establecer un *mecanismo ad-hoc* que hace posible la aglomeración y éste es el movimiento de la mano de obra industrial entre regiones²⁸. La dinámica migratoria se simplifica modelando el comportamiento de los trabajadores que responden a las diferencias salariales reales entre las regiones, como una emigración a aquellas localizaciones que tienen mayores salarios abandonando las que ofrecen salarios menores que la media²⁹.

Como todo modelo de Geografía Económica que hunde sus raíces en la teoría económica clásica de equilibrio, el modelo se resuelve encontrando una *solución de equilibrio* para los parámetros principales entre fuerzas de aglomeración (centrípetas) y fuerzas de diversificación (centrífugas).

Las *fuerzas de aglomeración* se explican a través de las vinculaciones regresivas y progresivas que el mercado local alimenta, y que son fruto del artificio matemático del modelo de CM que constituye el núcleo del modelo. La Figura 10 resume la naturaleza de estas vinculaciones monetarias: un creciente mercado local hace posible mantener una industria desproporcionadamente mayor (efecto mercado local) y alimenta un proceso migratorio debido a la caída de precios (efecto índice de precios) que conlleva menores costes para las empresas.

Las *fuerzas centrífugas* se explican en la pérdida de beneficio causada por la caída de precios (efecto índice de precios) que tiende a equilibrar las fuerzas anteriores. La Figura 11 sintetiza este equilibrio de fuerzas en lo que hemos denominado causalidad acumulativa del modelo de Núcleo y Periferia.

El balance resultante depende de los parámetros del modelo, como hemos visto en los apartados anteriores. La no linealidad de las ecuaciones del sistema hace que el

²⁸ Veremos en el apartado 1.4.1 una extensión del modelo que no requiere movimiento de mano de obra, fundamentando el proceso de aglomeración en la existencia de vinculaciones entre empresas (Venables, 1996).

²⁹ Fujita, Krugman y Venables (Fujita *et al*, 1999) dicen al respecto que su modelo puede considerarse como un juego evolutivo pues la dinámica migratoria puede expresarse mediante una dinámica de duplicación. En nuestra opinión la familia de modelos que plantean distan mucho de poder ser calificados como modelos evolutivos, como veremos en el siguiente capítulo, y sí como una familia de modelos de equilibrio que imponen esta dinámica migratoria para poder explicar cómo el sistema pasa de unos estados a otros.

estado de equilibrio no esté completamente determinado y dependa del proceso histórico de cada región.

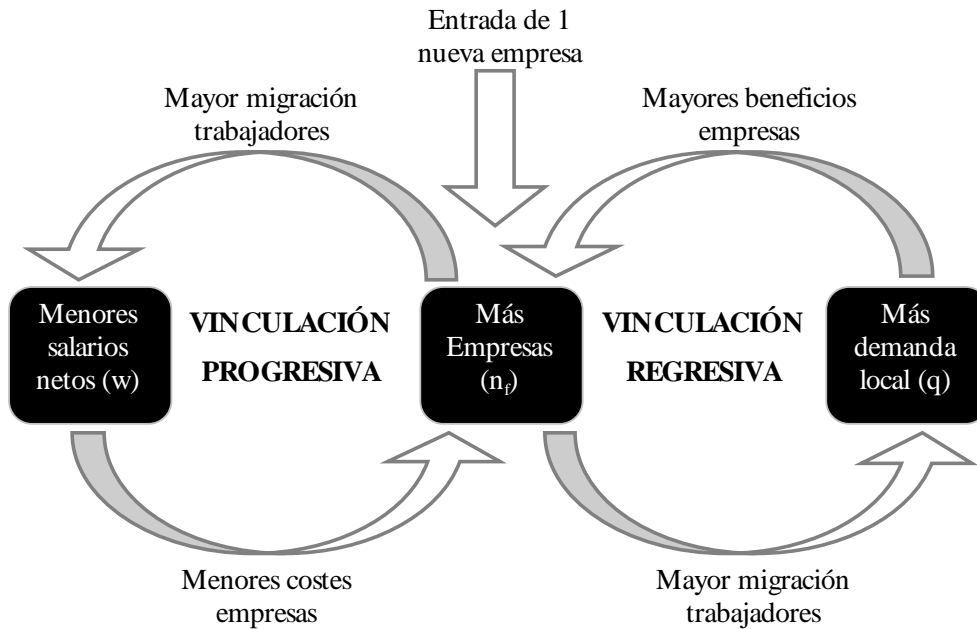


Figura 10. Vinculaciones progresivas y regresivas como mecanismos del proceso acumulativo en el modelo Núcleo y Periferia (elaboración propia).

El valor significativo que el modelo de Núcleo y Periferia aporta a la teoría sobre Geografía Económica es que ofrece una explicación a los fenómenos de aglomeración desde un marco microeconómico completo y riguroso, aunque en ciertos aspectos puede parecer una simplificación bastante alejada de los fenómenos reales.

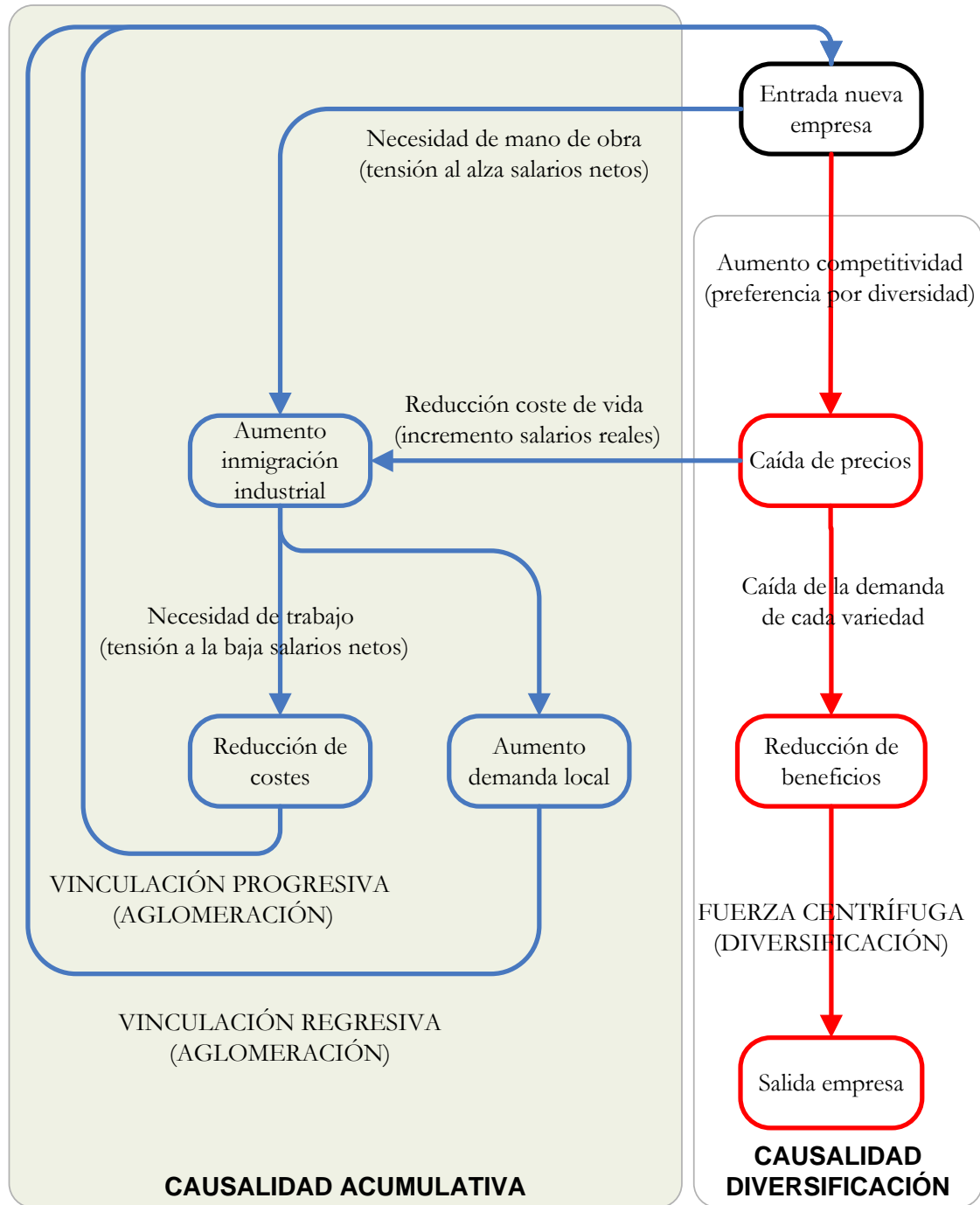


Figura 11. Diagrama de la causalidad acumulativa y de diversificación presentes en el modelo de Núcleo y Periferia (elaboración propia).

Las vinculaciones progresivas y regresivas que se manifiestan a través del mercado local y mercado laboral conforman las fuerzas centrípetas, que equilibran las fuerzas centrífugas provenientes del efecto índice de precios.

1.4 Extensiones del modelo de Núcleo y Periferia

El modelo de Núcleo y Periferia se fundamenta en tres suposiciones: las economías de escala a nivel de empresa, los costes de transporte que limitan el comercio interregional y la movilidad de la mano de obra industrial; siendo este último el mecanismo a través del cual las vinculaciones progresivas y regresivas originan un proceso de concentración.

Es posible, sin embargo, otra vía de aglomeración en forma de *vinculaciones inter-empresas* que resulta igualmente importante y que permite explicar escenarios de economía espacial donde la mano de obra no puede moverse libremente, caso de plantearnos por ejemplo modelos internacionales.

Ahora, las vinculaciones progresivas y regresivas se dejan sentir en las relaciones input-output entre empresas, cuando el producto fabricado por una empresa es utilizado como bien intermedio por otra. Unos simples cambios en algunas de las hipótesis nos permiten obtener un nuevo modelo de aglomeración con bienes intermedios que ofrece resultados semejantes a los ya comentados.

1.4.1 Causalidad acumulativa con bienes intermedios

Supondremos un nuevo mundo Dixit-Stiglitz, semejante al ya descrito en el apartado 1.3, en el que introducimos los siguientes cambios:

- La mano de obra industrial permanece siempre en la región de origen.
- Las empresas emplean un bien compuesto intermedio que se expresa como función de elasticidad constante de los bienes producidos por el resto de la industria³⁰, local y foránea. El *input* de las empresas se expresa mediante una función Cobb-Douglas combinación de la mano de obra y el bien intermedio, definiendo la unidad de coste de la Ec.(1.35). El nuevo parámetro α representa el peso del bien compuesto intermedio en la producción de la empresa.

³⁰ Para facilitar el tratamiento analítico se supone que la elasticidad de sustitución de esta función coincide con la definida para la sub-utilidad de los consumidores, Ec.(1.4), con lo que el índice de precios de cada región no cambia y es idéntico al expresado en la Ec.(1.19).

$$W_r = w_r^{1-\alpha} P_{fr}^\alpha \quad r = 1, 2 \quad (1.35)$$

- La demanda de una variedad en la región r se compone ahora de la demanda de los consumidores, que gastan μY_r en productos manufacturados y la demanda de las empresas locales que gastan $\alpha n_{fr} p_r q_r$ en bienes intermedios. Se define ahora el gasto de una región como:

$$E_r = \mu Y_r + \alpha n_{fr} p_r q_r \quad r = 1, 2 \quad (1.36)$$

El resto del modelo es semejante aunque incorporando algunos cambios fruto de las suposiciones anteriores. Así, la ecuación del precio de la variedad es igual a la Ec.(1.15) sustituyendo el salario neto w_r por el nuevo coste W_r . La ecuación de demanda también es similar a la Ec.(1.20) aunque incorporando el gasto real de cada región definido en la Ec.(1.36), es decir:

$$q_1 = \phi_1 p_1^{-\sigma} = \left(E_1 P_{f1}^{\sigma-1} + E_2 P_{f2}^{\sigma-1} T^{1-\sigma} \right) p_1^{-\sigma} \quad (1.37)$$

El análisis de los estados de equilibrio (Fujita *et al*, 1999) de este nuevo modelo es casi idéntico a lo visto en el apartado 1.3.5. Se obtiene un diagrama de estados con dos bifurcaciones que definen los puntos de ruptura y de sostenimiento. Las expresiones de estos puntos son idénticas a las del anexo 1.6, únicamente sustituyendo el parámetro μ por α que representa la importancia de los bienes intermedios en la industria.

1.4.2 La concentración industrial

El modelo de bienes intermedios (Venables, 1996) permite abordar fenómenos de aglomeración más concretos, como por ejemplo la concentración industrial y especialización de las regiones. Nuestro escenario ahora está constituido por países industrializados que comercian entre sí, aunque con la limitación de que la mano de obra industrial no puede moverse libremente. Bajo estas hipótesis cabría preguntarse si las diferentes industrias tendrán una presencia proporcional en cada país o si por el

contrario emerge algún tipo de fenómeno de aglomeración que hace que una industria se concentre en un único lugar³¹.

El modelo de concentración industrial propuesto por Fujita, Krugman y Venables (1999) se resume de la siguiente forma:

- El espacio se compone de *dos países* en los que desarrollan sus actividades *dos industrias* que utilizan un *mismo factor* de producción: la mano de obra que puede emplearse por igual en ambos sectores.
- Las dos industrias son monopolísticamente competitivas y utilizan una función de producción Cobb-Douglas que combina la mano de obra junto con un bien compuesto intermedio, definido como una función de elasticidad de sustitución constante de los bienes fabricados por ambas industrias, Ec.(1.35).
- Los consumidores de ambos países muestran unas preferencias por los productos manufacturados con la misma elasticidad de sustitución y gastan la mitad de sus presupuestos en los bienes de cada industria.
- Se define una *matriz input-ouput* simétrica para las industrias, Tabla 3, donde α representa el peso de los bienes intermedios de la propia industria, γ el peso de los bienes de la industria vecina y β el peso de la mano de obra.

Tabla 3. Matriz input-output de las industrias. Se cumple que $\alpha + \gamma + \beta = 1$.

	Industria 1	Industria 2
Industria 1	α	γ
Industria 2	γ	α
Mano Obra	β	β

El análisis de los estados de equilibrios de este nuevo modelo es muy parecido al descrito en la sección 1.3.5 y el anexo 1.6³². En este caso el equilibrio de dispersión se

³¹ Existen multitud de evidencias empíricas que muestran como las industrias suelen estar concentradas en unas pocas localizaciones (Saxenian, 1994; Audretsch & Feldman, 1996), caso de la industria de los semiconductores en Silicon Valley en USA (Saxenian, 1994), los famosos distritos industriales en Italia (Becattini, 1990a), o el área industrial de Londres (Baptista & Swann, 1998a) por citar unos pocos ejemplos.

caracteriza por que cada país alberga la mitad de las dos industrias, mientras que en el equilibrio de aglomeración cada industria se concentra en uno de los dos países. El modelo presenta un gráfico de estados muy parecido al del modelo de Núcleo y Periferia (ver Figura 9) con dos bifurcaciones que corresponden al punto de ruptura y el punto de sostenimiento.

Punto de ruptura

Analizamos el estado de equilibrio diversificado donde ambos países desarrollan las dos industrias. Definimos en su momento como punto de ruptura aquél valor del coste de transporte que hace que pasemos de esta situación estable a una situación inestable, que en este modelo desencadena un proceso de aglomeración de cada industria en un país. El valor exacto de este punto es muy parecido al obtenido para el modelo de Núcleo y Periferia, Ec.(1.46):

$$T_B = \left(\frac{(1 + \alpha - \gamma)(\sigma(1 + \alpha - \gamma) - 1)}{(1 - \alpha + \gamma)(\sigma(1 - \alpha + \gamma) - 1)} \right)^{\frac{1}{\sigma-1}} \quad (1.38)$$

Punto de sostenimiento

El punto de sostenimiento representa la frontera de estabilidad de un estado de equilibrio en el que cada país concentra una de las industrias. El análisis de este equilibrio se realiza de forma semejante a lo descrito en el anexo 1.6.2, comparando la demanda (beneficios) que experimenta una empresa si decidiera cambiar de lugar. Como era de esperar obtenemos una expresión muy parecida al modelo de Núcleo y Periferia, Ec.(1.51):

$$\left(\frac{q_{\text{diversificación}}}{q_{\text{concentración}}} \right)^{\beta} = T^{-\sigma(\alpha-\gamma)} \left(\frac{(1 + \alpha - \gamma)}{2} T^{1-\sigma} + \frac{(1 - \alpha + \gamma)}{2} T^{\sigma-1} \right) \quad (1.39)$$

Esta ecuación nos permite deducir un elemento nuevo que proviene de la dependencia entre industrias. Si las vinculaciones entre industrias son más fuertes que las internas de cada una de ellas ($\alpha - \gamma < 0$), observando el término fuera del paréntesis,

³² No vamos a entrar en la demostración de las ecuaciones de este modelo porque son muy similares a las ya obtenidas para el modelo de Núcleo y Periferia, y no aportan más valor al objetivo de este capítulo. Si se quiere conocer un detalle de las mismas se puede consultar el capítulo 15 de Fujita *et al* (1999).

concluimos que la concentración nunca es sostenible. Si ocurre lo contrario ($\alpha - \gamma > 0$), se abre la puerta a la concentración que dependerá de los costes de transporte, y que define el balance de los dos términos de dentro del paréntesis³³.

El diagrama de estados de equilibrio se resume de forma análoga al modelo base de Núcleo y Periferia (Figura 9). Cuando los costes de transporte son muy elevados ($T > T_s$) el único equilibrio estable es la diversificación de las industrias en los dos países. Para costes de transporte más bajos ($T_B < T < T_s$) la concentración es posible. Y finalmente para costes todavía más bajos ($T < T_B$) la concentración es necesaria.

1.5 Discusión

En este capítulo hemos introducido la aproximación teórica a los fenómenos económico-espaciales formulada por la Nueva Geografía Económica. Hemos tratado de describir con suficiente profundidad el aparato formal sobre el que esta disciplina fundamenta su teoría, que no es otro que el modelo de competencia monopolística de Dixit-Stiglitz extendido a un mundo compuesto por diferentes localizaciones. Los fenómenos de aglomeración surgen como un proceso endógeno determinado por las economías de escala de las empresas, la movilidad de la mano de obra industrial y los costes de transporte que representan las barreras al comercio interregional.

Habitualmente la investigación sobre la economía espacial recurre al concepto de *economías de aglomeración* para explicar la emergencia de fenómenos de aglomeración. La cuestión que se plantea el investigador a continuación es la de cómo explicar la naturaleza y los mecanismos de estas economías, si quiere ir más allá del argumento casi tautológico de que existen aglomeraciones porque existen beneficios para que las empresas estén juntas. Es aquí donde difieren significativamente muchos de los trabajos de investigación, y es aquí donde pensamos que la Nueva Geografía Económica hace una valiosa aportación, puesto que ofrece un modelo formal que permite comprender estas economías de aglomeración.

³³ Como ocurre en el modelo de Núcleo y Periferia la concentración es un hecho para valores de T muy pequeños, y sostenible para valores de T no muy elevados (punto de sostenimiento).

Entendemos que las bases teóricas de la Nueva Geografía Económica resultan insuficientes para comprender la complejidad de los fenómenos de aglomeración. La *vieja* Geografía Económica, con más acento en la Geografía que en la Economía, cuestiona una aproximación analítica cuyas restricciones son difícilmente compatibles con los fenómenos reales.

Pero no hace falta alejarse de la teoría económica para plantear algunas discrepancias que son también importantes. Nos referimos principalmente a la visión que tiene la Nueva Geografía Económica del sistema económico como un sistema en equilibrio y homogéneo, sin la cual no sería posible proponer y resolver su modelo matemático. Por el contrario, existe una corriente de pensamiento que llamamos Economía Evolucionista que se aleja significativamente de esta aproximación estática, al subrayar la importancia de la naturaleza dinámica y heterogénea del sistema económico.

Según la visión evolucionista, los agentes económicos no son homogéneos sino que difieren en sus características y comportamientos; tampoco son perfectamente racionales, ni toman decisiones óptimas y disponen de información perfecta del mercado; la dimensión espacial no puede ser reducida a una variable de coste de transporte. En definitiva, una aproximación evolutiva a los fenómenos económico-espaciales ha de ser entendida como un proceso dinámico y evolutivo, donde la diversidad de los agentes económicos y del espacio geográfico juegan un papel relevante. Este enfoque evolucionista de la Geografía Económica será desarrollado en el siguiente capítulo.

1.6 Apéndice: cálculo del punto de ruptura y punto de sostenimiento

1.6.1 Punto de ruptura

En este apartado demostraremos las expresiones para el punto de ruptura y punto de sostenimiento del modelo de Núcleo y Periferia. Como ya hemos señalado anteriormente utilizaremos la siguiente aproximación para analizar la estabilidad del modelo: consideramos que el mercado laboral se ajusta de forma instantánea, mientras que la entrada y salida de empresas sigue un proceso más lento. Los resultados son

similares a la aproximación opuesta seguida por Krugman (Puga, 1999), aunque permite, a nuestro juicio, una mejor comprensión del modelo.

Partimos de un estado de equilibrio simétrico con la industria igualmente repartida entre las dos regiones. La condición sobre el mercado laboral significa que los trabajadores se mueven instantáneamente entre las dos regiones haciendo que los *salarios reales* sean siempre iguales en ambas. Expresado mediante una ecuación diferencial (usando la notación $\dot{x} = dx/x$):

$$\dot{\omega} = 0 \quad (1.40)$$

Esta condición no implica que para que exista un equilibrio en la industria los *salarios nominales* tengan que ser también iguales en las dos regiones, toda vez que ya hemos demostrado que los precios en ambas regiones pueden ser distintos.

Sabemos que las empresas se comportan maximizando beneficios, lo que nos permite diferenciar la Ec.(1.15) que relaciona los ingresos marginales y los costes marginales como:

$$\left(\frac{\sigma-1}{\sigma}\right)p = cw \Rightarrow \dot{p} = \dot{w} \quad (1.41)$$

El criterio para analizar el equilibrio es calcular el cambio que experimentan los beneficios de las empresas ante variaciones en el número de empresas en la región. Sabemos que los beneficios están directamente relacionados con la demanda de producto, Ec.(1.16), por lo que nuestro análisis se centra en estudiar la ecuación diferencial de la demanda, Ec.(1.25). Sustituimos \dot{P}_f y \dot{Y} a partir de las Ec.(1.23) y Ec.(1.32), y tenemos en cuenta la condición de pleno empleo, Ec.(1.18), y la variación de precios, Ec.(1.41), para obtener:

$$\dot{q} = Z(\mu - Z)\dot{n}_f + (Z^2(\sigma - 1) + Z\mu - \sigma)\dot{w} \quad (1.42)$$

El primero término de la derecha corrobora el resultado sobre la condición de equilibrio obtenido en el apartado 1.3.4, donde decíamos que bajo el supuesto de

salarios netos constantes ($\dot{w} = 0$) el estado de equilibrio simétrico era inestable siempre que $\mu > Z$.

Diferenciamos la Ec.(1.28) de salarios reales teniendo en cuenta la condición de partida, Ec.(1.40), obteniendo:

$$\dot{w} = \mu \dot{P}_f \quad (1.43)$$

que llevamos a la Ec.(1.23):

$$\dot{P}_f = -\frac{Z}{(\sigma-1)(1-\mu Z)} \dot{n}_f \quad (1.44)$$

lo que nos permite finalmente expresar la Ec.(1.42) diferencial de la demanda como:

$$\dot{q} = Z \frac{(2\sigma-1)\mu - \sigma(1+\mu^2)Z - Z}{(\sigma-1)(1-\mu Z)} \dot{n}_f \quad (1.45)$$

El análisis de la estabilidad del equilibrio inicial de una industria simétricamente diversificada se realiza sobre esta última ecuación. El signo de la relación entre la demanda y el número de empresas \dot{q}/\dot{n}_f nos habla de la estabilidad del estado de equilibrio. En la Figura 12 se ha representado dicha relación para diferentes valores de los parámetros del modelo.

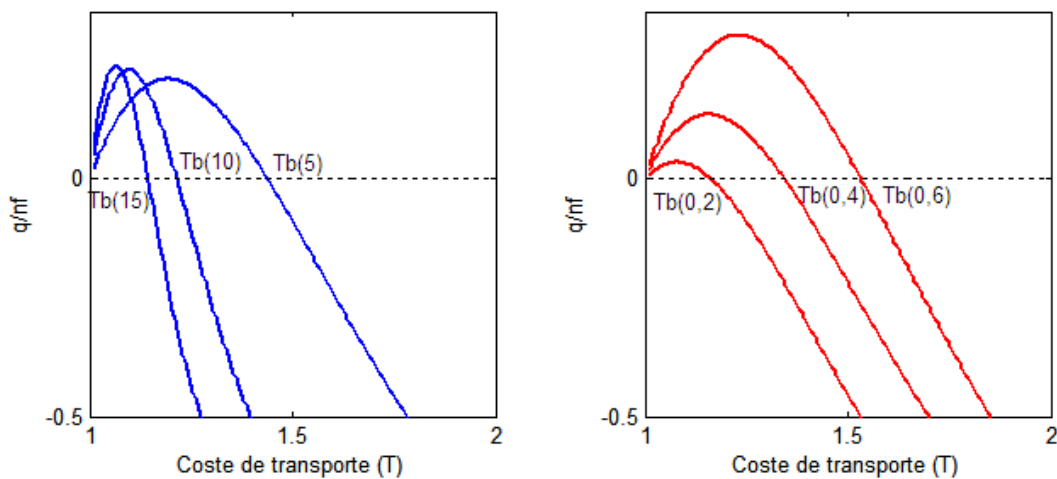


Figura 12. Ratio \dot{q}/\dot{n}_f y punto de ruptura T_B .

Para diferentes valores de σ con $\mu = 0,5$ (izquierda), y para diferentes valores de μ con $\sigma = 5$ (derecha). El rango de valores (T_B, ∞) representa el área de equilibrio simétrico (industria diversificada).

Como el denominador de la Ec.(1.45) siempre es positivo, tal y cómo se han definido el rango de los parámetros del modelo³⁴, nuestra atención se centra en el numerador³⁵. Teniendo en cuenta la Ec.(1.24) del índice de coste de transporte el numerador se hace cero para un valor del coste que llamamos *punto de ruptura*:

$$T_B = \left(\frac{(1+\mu)(\sigma(1+\mu)-1)}{(1-\mu)(\sigma(1-\mu)-1)} \right)^{\frac{1}{\sigma-1}} \quad (1.46)$$

El punto de ruptura nos permite definir el rango de estabilidad del estado de equilibrio con la industria simétricamente diversificada. En la Figura 12 se observa que para valores del coste de transporte (T_B, ∞) la demanda cambia negativamente con relación al número de empresas. Llevado al estado inicial de equilibrio, significa que si una región absorbe una empresa de su vecina lo hace a costa de disminuir la demanda, y consecuentemente los beneficios de todas las demás empresas allí ubicadas, lo que desencadena un proceso que tiende a expulsar la empresa y restaurar la situación de equilibrio simétrico. Análogamente se entiende que el rango de costes de transporte $(1, T_B)$ determina la zona de inestabilidad del equilibrio inicial.

El valor del punto de ruptura T_B depende de los parámetros del modelo $\{\mu, \sigma\}$ como se aprecia en la Figura 12:

- Una industria con productos poco diferenciados (alta elasticidad σ) reduce T_B y consiguientemente el umbral de coste de transporte para el que la diversificación industrial es estable (ver Figura 12 izquierda). Un escenario con productos casi sustitutivos perfectos determina un equilibrio con menos variedades (ver Ec.(1.18)) y empresas trabajando a mayor escala (ver Ec.(1.16)), donde las vinculaciones tienen menos fuerza permitiendo que cada región albergue una industria local rentable para menores costes de transporte.

³⁴ $\sigma > 1; 0 < \mu < 1; 0 < Z < 1$

³⁵ Krugman además añade a esta ecuación Ec.(1.45) una condición que llama “*sin agujero negro*” (Krugman, 1991). Podría darse el caso de que aunque los costes de transporte fuesen infinitos ($Z=1$) el único equilibrio estable fuese la aglomeración industrial haciendo imposibilitando cualquier otro análisis del modelo. Del numerador de esta ecuación haciendo $Z=1$ se deduce que esta situación se evita siempre que $\sigma - 1/\sigma > \mu$.

- El parámetro μ quizá juega un papel más claro (ver Figura 12 derecha). Cuando la industria es más importante en la renta de una región, altos valores de μ , las vinculaciones progresivas y regresivas son tanto más importantes y desencadenan procesos de aglomeración incluso con costes de transporte elevados, haciendo que el intervalo de costes para los que el equilibrio simétrico es estable sea menor.

1.6.2 Punto de sostenimiento

Ahora nuestro análisis parte de un estado de equilibrio en el que la industria se encuentra concentrada en una de las regiones (núcleo), por ejemplo la región 1. Seguimos manteniendo la aproximación de que el movimiento de trabajadores es instantáneo con lo que los *salarios reales* en ambas regiones son iguales, Ec.(1.40), mientras que la entrada y salida de empresas es más lenta.

En esta situación, donde la región 2 únicamente obtiene rentas de la agricultura mientras que la región 1 obtiene la misma cantidad de rentas de la agricultura más la parte correspondiente a las rentas de la industria $\mu(Y_1 + Y_2)$, se deduce que:

$$Y_2 = \frac{1-\mu}{1+\mu} Y_1 \quad (1.47)$$

Fácilmente se entiende que el índice de precios industriales de la región 2, que importa todas las unidades de la región 1, sea ahora:

$$P_{f2} = P_{f1} T \quad (1.48)$$

La estrategia para analizar la estabilidad de este estado de equilibrio asimétrico es comparar la demanda a la que se enfrenta una empresa localizada en el cluster $q_{núcleo}$ con la demanda a la que se enfrentaría si decidiera abandonar la región 1 y ubicarse en la región 2 $q_{periferia}$. Teniendo en cuenta las Ec.(1.47) y (1.48), la Ec.(1.20) de demanda del núcleo queda como:

$$q_{núcleo} = \phi_1 P_1^{-\sigma} = \left(\frac{2\mu}{1+\mu} Y_1 P_{f1}^{\sigma-1} \right) P_1^{-\sigma} \quad (1.49)$$

Si la misma empresa decidiera moverse a la región 2, y teniendo en cuenta las mismas Ec.(1.47) y (1.48), la Ec.(1.20) de demanda que ahora llamamos $q_{periferia}$ queda como:

$$q_{periferia} = \phi_2 p_2^{-\sigma} = \left[\mu Y_1 P_{f1}^{\sigma-1} \left(T^{1-\sigma} + T^{\sigma-1} \frac{1-\mu}{1+\mu} \right) \right] p_2^{-\sigma} \quad (1.50)$$

El valor de la relación $q_{periferia}/q_{núcleo}$ nos permite saber si una empresa tiene incentivos para moverse, y consecuentemente romper la situación inicial de equilibrio. Puesto que los beneficios son proporcionales a la demanda que satisface la empresa, si este cociente es mayor que uno, indica que la empresa obtendrá mayores beneficios deslocalizándose del cluster por lo que el estado inicial de asimetría industrial será inestable. La relación entre demandas se expresa como:

$$\frac{q_{periferia}}{q_{núcleo}} = T^{-\sigma\mu} \left(\frac{(1+\mu)}{2} T^{1-\sigma} + \frac{(1-\mu)}{2} T^{\sigma-1} \right) \quad (1.51)$$

El término de la derecha aparentemente complejo nos permite diferenciar distintos efectos. El paréntesis de la ecuación nos dice lo siguiente: una empresa que decide moverse del cluster a la periferia disfruta del beneficio de disponer de un nuevo mercado local ($T^{\sigma-1} > 1$), aunque incurre en la desventaja de tener que exportar al cluster que abandona ($T^{1-\sigma} < 1$).

El equilibrio entre estos dos efectos es ambiguo y dependerá de los parámetros del modelo $\{\mu, \sigma, T\}$. El balance se ve además condicionado negativamente con una clara desventaja para la empresa que se mueve hacia la periferia, cuantificada en el término fuera del paréntesis ($T^{-\sigma\mu} < 1$), que se corresponde con el hecho de que esta empresa ha de pagar mayores salarios netos a sus trabajadores puesto que el coste de vida en la periferia es claramente mayor que en el núcleo, Ec.(1.48).

El resultado de los efectos expuestos en la Ec.(1.51) no es trivial. La Figura 13 recoge la variación entre demandas para diferentes valores de los parámetros del modelo. Podemos hacer una interpretación más sencilla estudiando la ecuación para los valores extremos de los costes de transporte (Neary, 2001). Cuando no existen barreras de ningún tipo para el comercio y $T=1$ la localización de la empresa es irrelevante, pues

obtiene los mismos resultados en ambas regiones. Si provocamos un pequeño incremento de los costes de transporte desde esta situación la relación anterior es siempre menor que uno, luego el estado de equilibrio de aglomeración para costes de transporte muy pequeños es siempre estable.

El resultado cambia si incrementamos significativamente los costes de transporte. Existe un valor elevado de los costes que hace que la expresión de la Ec.(1.51) sea igual a la unidad. A este valor se le da el nombre de *punto de sostenimiento* T_S . Se comprueba que para costes de transporte iguales o inferiores a este valor el estado de equilibrio de aglomeración es siempre sostenible. El valor de este punto depende de los parámetros $\{\mu, \sigma\}$, como podemos ver en la Figura 13:

- Una baja elasticidad σ equivalente a una industria con productos muy diferenciados eleva T_S y por tanto el intervalo de costes de transporte para los que el cluster es sostenible (ver Figura 13 izquierda). Por el contrario un valor alto de σ reduce significativamente este rango, por lo que ante pequeños costes de transporte la industria se diversifica en torno a los dos mercados locales (Fujita *et al*, 1999).
- El efecto de la importancia de la industria μ en las preferencias de los consumidores sobre la sostenibilidad del estado núcleo-periferia es más intuitivo (ver Figura 13 derecha). Cuando la industria tiene un peso importante, altos valores de μ , las vinculaciones progresivas y regresivas son mayores haciendo que el intervalo de costes de transporte en el que el equilibrio es estable sea también mayor.

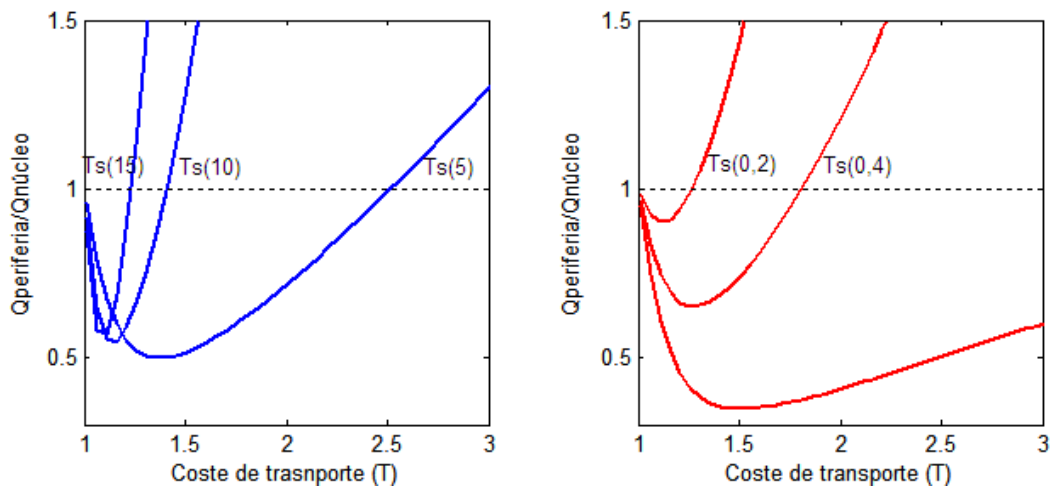


Figura 13. Ratio $q_{periferia}/q_{núcleo}$ y punto de sostenimiento T_s .

Para diferentes valores de σ con $\mu = 0,5$ (izquierda) y para diferentes valores de μ con $\sigma = 5$ (derecha). El rango de valores $(1, T_s)$ representa el área de sostenimiento del equilibrio núcleo-periferia.

“If everything occurred at the same time there would be no development. If everything existed in the same place there could be no particularity. Only space makes possible the particular which then unfolds in time”
August Lösch (1906-1945)

Capítulo 2

Economía Evolucionista y Geografía Económica

En este capítulo introducimos la aproximación evolucionista al estudio de la Economía y más concretamente al estudio de los fenómenos de aglomeración espacial. Como hemos visto en el capítulo anterior, la *Nueva Geografía Económica* impone importantes restricciones en sus modelos analíticos que no son compartidas por la corriente de investigación geográfica tradicional. Sin embargo, en nuestra opinión, el diálogo entre la Economía Evolucionista y la tradicional Geografía Económica resulta sencillo. Es más, la incorporación de la dimensión espacial en los modelos evolutivos representa un paso lógico y natural en el desarrollo de la teoría económica evolucionista.

Comenzamos el capítulo haciendo una introducción a la Economía Evolucionista. Frente a la visión clásica preocupada por el equilibrio y que tiende a considerar como exógeno cualquier cambio en el sistema económico, la Economía Evolucionista considera el cambio como un proceso endógeno y complejo que depende de la diversidad de características, comportamientos y relaciones de los agentes económicos.

A continuación describimos los elementos presentes en una aproximación evolucionista: *diversidad, procesos de selección y procesos de desarrollo*. En cualquier sistema económico existe una diversidad de agentes que difieren en su conocimiento y capacidades, encarnadas en el concepto de rutinas. Sobre este sistema operan los procesos de selección que albergan los mecanismos de replicación de los agentes mejor adaptados y los procesos de desarrollo que agrupan las actividades de investigación e innovación por las que los agentes crean nueva diversidad.

Posteriormente describimos la familia de modelos de dinámica industrial propuestos inicialmente por Nelson y Winter. Describen la dinámica evolutiva de una industria caracterizada por un conjunto heterogéneo de empresas, que difieren en las rutinas que emplean; un proceso de selección que acontece en el mercado, que llamamos competición de Schumpeter; y un proceso de desarrollo por el que las empresas pueden imitar o innovar rutinas.

Por último, tratamos de integrar todos estos conceptos evolucionistas con la aproximación tradicional de la Geografía Económica y describimos algunas propuestas formales que tratan de explicar fenómenos de aglomeración desde claves evolucionistas.

2.1 Introducción a la Economía Evolucionista

Dar una definición exacta de lo que es la Economía Evolucionista puede ser una tarea compleja. Bajo este término encontramos una gran diversidad de autores y estudios que hacen difícil cualquier intento por sintetizar las claves de esta disciplina. Sí podemos afirmar que se trata de una corriente preocupada por la dimensión dinámica y cambiante del sistema económico, que llamamos evolutiva, alejada por tanto del pensamiento económico mayoritario más entretenido en el equilibrio del sistema.

Conviene dejar claro que no todo trabajo sobre la evolución económica tiene por qué ser clasificado como Economía Evolucionista, aunque todo trabajo sobre Economía Evolucionista sí hable sobre evolución económica y tecnológica.

La mayoría de la literatura que podemos clasificar como económicamente evolucionista comparte un punto de partida y es la insatisfacción por la teoría económica clásica³⁶, pero a partir de ahí, diverge notablemente tanto en las hipótesis como en la metodología que emplea.

La otra característica que comparten muchas de las líneas de investigación sobre Economía Evolucionista es su relación con la teoría evolucionista de la Biología. Al

³⁶ La corriente mayoritaria en Economía comparte un marco formal de estudio que puede resumirse en el modelo general de equilibrio, en el que se fundamenta una parte muy importante de la teoría microeconómica, y que encontramos habitualmente en los libros de texto. Algunos economistas, normalmente críticos con esta modelización del problema, suelen denominarla como aproximación clásica, neoclásica u ortodoxa.

menos en cuanto al marco conceptual en el que se inscriben muchos de los trabajos, pues en la concreción de las ideas evolucionistas encontramos también importantes diferencias que se deben principalmente a la dificultad para trasladar los modelos biológicos evolucionistas a los sistemas económicos.

Esta diversidad de trabajos bajo el paraguas evolucionista se debe, en nuestra opinión, a que la Economía Evolucionista sigue siendo una disciplina por hacer, tanto en la elaboración de sus fundamentos como en el desarrollo del cuerpo teórico y metodológico³⁷.

2.1.1 Evolución de la Economía Evolucionista

La historia de la Economía Evolucionista está estrechamente relacionada con el interés de muchos economistas por explicar la naturaleza del *cambio económico*. El punto de separación con otras teorías económicas se encuentra en el cambio de perspectiva, de considerar un sistema económico pasivo que se adapta a cambios exógenos a representarlo como un sistema completo que evoluciona de forma autónoma (Andersen, 1994, 275-307).

A continuación haremos un sencillo repaso histórico por las principales contribuciones al pensamiento evolucionista.

Algunos antecedentes de la Economía Evolucionista: de Veblen a Schumpeter

El primer economista en utilizar el concepto de Economía Evolucionista fue Veblen en su artículo “*Why is Economics not an evolutionary science*” (1898)³⁸. Aunque lejos del significado que actualmente damos al término, este sociólogo y economista introduce términos como antecedentes, herencia y evolución cultural, para explicar el comportamiento económico como un acto social y culturalmente influenciado, muy alejado de la perspectiva clásica individual y puramente hedonista.

³⁷ Esto se puede apreciar claramente en la intención de trabajos recientes como por ejemplo el libro sobre fundamentos de la economía evolucionista de Dopfer (2005).

³⁸ Una referencia al título provocador del artículo de Veblen (1898) lo encontramos recientemente en el trabajo de Boschma y Frenken “*Why is economic geography not an evolutionary science?*” (2006b) que pretende argumentar la necesidad de una aproximación evolucionista a la Geografía Económica.

La obra de Schumpeter suele ser invocada en el ámbito de la Economía Evolucionista por ser uno de los primeros economistas en cuestionar seriamente la teoría económica clásica³⁹. Este economista austriaco plantea formalmente cuestiones sobre la naturaleza de la evolución económica, resaltando la importancia de la figura del emprendedor como creador de las innovaciones que impulsan la economía (Schumpeter, 1939).

Schumpeter en ningún momento establece alguna relación entre su pensamiento y las ideas evolucionistas de Darwin. Sin embargo, algunos autores le consideran como iniciador de la teoría económica evolucionista en la medida que adelanta muchas de las cuestiones claves que serán abordadas en los años siguientes (Andersen, 1994, 2-5).

Despegue de la Economía Evolucionista: Nelson y Winter

La Economía Evolucionista alcanza un punto de inflexión con la publicación del libro *“An evolutionary theory of economic change”* de Nelson y Winter (1982), que inicia una etapa de creciente interés científico en este campo. En la obra, Nelson y Winter formalizan una aproximación evolucionista al cambio económico con una clara influencia del pensamiento Darwiniano.

Más allá de sus modelos de crecimiento económico y de dinámica industrial, a nuestro juicio, la principal contribución de este trabajo es la utilización de la simulación computacional como instrumento para hacer teoría económica. En palabras de Andersen: *“a much more important aspect of Nelson and Winter’s work is that they have created the outlines of a language and a modeling scheme which help us express the poorly understood evolutionary process”* (1994, 95).

La visión de la evolución económica como un proceso de Markov permite a los autores dar un salto a los modelos computacionales que no son más que una aproximación algorítmica de la metodología evolucionista (Andersen, 1994, 18-19)⁴⁰.

³⁹ La relación entre la Economía Evolucionista y la obra de Schumpeter no es compartida por todos los economistas. Una interesante revisión que defiende esta relación la encontramos en el artículo de Fagerberg (2003).

⁴⁰ Andersen contrapone las aproximaciones computacionales, que llama algorítmicas, con otras aproximaciones analíticas, que llama formales. Nosotros no compartimos esta clasificación por ser un

Esta visión computacional tiene hoy en día su principal expresión en el concepto *Agent-Based Computational Economics* (ACE), que abordaremos en el siguiente capítulo, en el que se puede enmarcar una parte importante de los trabajos actuales sobre Economía Evolucionista.

Los autores proponen una familia de modelos industriales, que veremos con detalle más adelante y que podemos resumir de la siguiente forma: una dinámica evolutiva caracterizada por un conjunto diverso de empresas, que difieren en las rutinas que emplean; un proceso de selección que acontece en el mercado, que llamamos *competición de Schumpeter*; y un proceso de desarrollo por el que las empresas pueden imitar o innovar rutinas.

Un aspecto importante de sus modelos es la forma en que integran importantes aportaciones de trabajos previos de autores como Alchian, Simon y Schumpeter (Nelson & Winter, 1982, 33-41):

- El cuerpo evolucionista proveniente principalmente de Alchian (1950), así como de trabajos anteriores de Winter. Los modelos recogen conceptos evolucionistas propuestos por Alchian, como la competición de las empresas en los mercados, en una directa analogía con la competición biológica, o la herencia que se traduce en la capacidad de las empresas para imitar rutinas.
- El comportamiento de las empresas incluye el concepto de *racionalidad limitada* propuesto por Simon (1959). Las decisiones suelen ser complejas y los agentes económicos no conocen todas las posibles alternativas, por lo que toman sus decisiones utilizando reglas sencillas, tratando de obtener soluciones que satisfagan sus objetivos. Esto está en clara contraposición con la visión clásica de agentes racionales que deciden maximizando entre el conjunto conocido de alternativas posibles.
- Los autores comparten la idea de Simon de que la simulación computacional proporciona la herramienta adecuada para implementar y estudiar estas

poco confusa, pues en nuestra opinión los modelos computacionales son también en sí mismos formales, aunque generalmente no se aborden de forma analítica.

decisiones, que difícilmente podría hacerse dentro de la formulación analítica clásica.

- La obra de Schumpeter está presente en la mayor parte del libro⁴¹. Principalmente la idea de que las innovaciones, expresadas como cambios en las rutinas de comportamiento, desequilibran continuamente el sistema económico, alejándolo de la competencia perfecta que presupone la teoría clásica. En este sentido, el crecimiento económico se explica a través de estos cambios que otorgan nuevas oportunidades de negocio y ventajas competitivas a los innovadores.

Desarrollo de la Economía Evolucionista: 20 años de creación muy diversa

La obra de Nelson y Winter ha impulsado un creciente programa de investigación en los últimos 20 años. Sin pretender hacer un estudio completo de todos estos trabajos, vamos a citar algunos de los que en nuestra opinión son más interesantes⁴².

Una de las líneas de investigación impulsadas significativamente tras la publicación del libro de Nelson y Winter (1982) es la que se centra en el *crecimiento económico*: la evolución a largo plazo de las principales variables macroeconómicas como el PIB o la renta per cápita. El modelo de crecimiento propuesto por Nelson y Winter (Nelson & Winter, 1982, 206-234) ha sido posteriormente complementado siguiendo dos aproximaciones significativamente distintas:

- De un lado encontramos un conjunto de trabajos (Chiaromonte & Dosi, 1993; Silverberg & Verspagen, 1994; Dosi *et al.*, 1994) que desarrollan una *aproximación microeconómica*, fiel a la interpretación original de Nelson y Winter, mediante un análisis *bottom-up* que trata de modelizar el comportamiento

⁴¹ Esta idea queda resumida perfectamente en la afirmación de los autores: “*it could reasonably be said, that we are evolutionary theorist for the sake of being neo-Schumpeterians*” (Nelson & Winter, 1982, 39)

⁴² Existen diversos ensayos sobre la investigación en Economía Evolucionista desde el punto de vista del tipo de fenómenos económicos que se abordan (Nelson, 1995; Silverberg, 1997; Nelson & Winter, 2002; Silverberg & Verspagen, 2005). Silverberg (1997) hace una interesante revisión desde la perspectiva metodológica, mientras que Kwasnicki (2003) hace una revisión desde el punto de vista de los elementos evolutivos contenidos en los modelos.

individual de las empresas y estudiar la dinámica evolutiva mediante simulación computacional.

- De otro lado tenemos trabajos como (Silverberg & Lehnert, 1993) que han optando por una *aproximación macroeconómica*, es decir, una modelización del fenómeno de crecimiento desde una perspectiva agregada con la intención de mantener en lo posible el manejo matemático de los modelos, aunque en el proceso de generalización se pierda capacidad de descripción.

Otra importante línea de investigación evolucionista, más heterogénea que la anterior, es la que se estudia la *dinámica industrial*: la evolución de una industria como resultado de un proceso continuo de innovaciones tecnológicas en las empresas. Aquí claramente se ha continuado con la línea microeconómica iniciada por Nelson y Winter.

Una de las dificultades para desarrollar una aproximación evolucionista de la dinámica industrial es la de cómo formalizar la evolución tecnológica (Silverberg & Verspagen, 2005). Algunos trabajos utilizan una aproximación de *capital embodied*⁴³, como en el modelo de difusión tecnológica propuesto por Silverberg (1988). Sin embargo, es más frecuente encontrarnos con la formalización opuesta, *capital disembodied*, como por ejemplo en el modelo de dinámica industrial de *Schumpeterian*

⁴³ El término *embodied* relaciona tecnología con inversión tangible (bienes y equipos), describiendo un escenario en el que los cambios tecnológicos (innovaciones) se concretan cuando la empresa realiza inversiones en nuevos equipos. Esta visión de la evolución tecnológica reproduce una situación real de las empresas, en las que suelen coexistir en un momento dado diferentes tecnologías que difieren en sus prestaciones y edad. La forma normal de implementar esta concepción del capital en los modelos evolucionistas ha sido mediante el concepto de *vintage capital* ampliamente utilizado en la teoría de crecimiento económico: las inversiones en máquinas y otras tecnologías conforman un *stock de capital* diverso en edad y prestaciones. En los modelos evolucionistas esto se traduce en que el rendimiento de una empresa se calcula como promedio de los rendimientos del stock de inversiones en un momento dado. El término opuesto, *disembodied*, describe una aproximación a los cambios tecnológicos menos tangible que la visión materialista anterior, y asocia la tecnología al conjunto de capacidades organizativas e individuales directamente relacionadas con el conocimiento de los trabajadores y las empresas. Este conocimiento evoluciona (innova) mediante una dinámica acumulativa que podría describirse mediante el conocido concepto de *learning by doing* de Arrow (1962) condicionado significativamente por las externalidades de conocimiento en forma de *knowledge spillovers*. En los modelos evolucionistas esto se traduce en que cada cambio tecnológico en una empresa conlleva un salto global en su productividad y rendimiento.

*competition*⁴⁴ propuesto por Nelson y Winter (1982, 275-308) y que ha dado origen a una muy diversa creación evolucionista:

- Por ejemplo, Winter (1984) complementa el anterior modelo introduciendo el concepto de *régimen tecnológico*, con el que pretende diferenciar si la fuente de innovación tecnológica es la propia empresa, en un proceso acumulativo, o tiene una base de conocimiento pública externa a la misma. Además introduce la posibilidad de que las empresas cambien su estrategia de I+D durante la simulación si sus resultados son menores que los resultados promedios de la industria.
- Jonard y Yildizoglu (1998) introducen el concepto de aprendizaje localizado y rendimientos crecientes en el modelo original de Nelson y Winter mediante un sencillo *grid*, para estudiar sus efectos en la evolución tecnológica de una industria.
- Yildizoglu (2002) profundiza en la idea de aprendizaje aprovechando los *algoritmos genéticos* para modelar el aprendizaje de estrategias de I+D (las pueden modificar los recursos que emplean en I+D en cada momento), en un modelo de dinámica industrial en lo demás muy semejante a los anteriores.
- Dosi propone el estudio de las principales propiedades (*stylized facts*) o regularidades presentes en muchas industrias desde una aproximación *bottom-up* evolucionista, por ejemplo la evolución de la estructura de las industrias y la distribución de los tamaño de las empresas (Dosi *et al*, 1995). Siguiendo esta línea Winter (2000) propone un modelo analítico en el que el cambio tecnológico es liderado únicamente por la entrada de nuevas empresas en el mercado.
- Kwasnicki (1996, 83-100) propone un completo y complejo modelo de industria, donde los productos son las unidades de selección y las empresas no sólo pueden innovar en relación a la productividad del capital, como los modelos originales de Nelson y Winter (1982), sino que además pueden innovar en las características de los productos que fabrican. Resulta un modelo completo en la medida en que integra muchas de las aproximaciones evolucionistas sobre cambio tecnológico,

⁴⁴ El término *Schumpeterian competition* suele utilizarse para describir un modelo evolucionista donde se desea estudiar la evolución de alguna rutina de comportamiento de las empresas en una industria que produce un producto homogéneo.

innovación y dinámica industrial, aunque encierra una importante complejidad en algunas de sus aproximaciones, como por ejemplo en la modelización de las rutinas y su relación con las características y competitividad de los productos.

La generalización de la aproximación *bottom-up* al estudio de sistemas económicos complejos junto con la utilización de técnicas de *inteligencia artificial*, principalmente para modelar las habilidades cognitivas de agentes artificiales, se puede inscribir en un programa de investigación de creciente interés que llamamos *sociedades artificiales de agentes*⁴⁵;

La aplicación de estas técnicas en el dominio económico, como ya adelantamos, tiene una importante representación en *Agent-Based Computational Economics* (Tesfatsion, 1996), donde la teoría evolucionista ha encontrado un hueco importante. Encontramos aportaciones interesantes de las economías artificiales, con importantes contribuciones de los principios evolucionistas, en los mercados financieros artificiales (Arthur, 1995) y también en modelos de dinámica industrial (Pajares *et al.*, 2003c).

2.1.2 Objetivos y alcance de la Economía Evolucionista

La línea de investigación sobre Economía Evolucionista se enfrenta a numerosas dificultades que nacen de la propia visión evolucionista del sistema económico. El elemento clave de un proceso evolucionista es la novedad, fuente de diversidad, que no sólo ocurre de forma incierta⁴⁶ sino que además ocasiona cambios en el sistema de naturaleza y grado diverso.

Frente a una visión estática preocupada por el equilibrio y que tiende a considerar como exógeno cualquier cambio en el sistema económico, la Economía Evolucionista pretende dibujar desde una perspectiva en movimiento, considerando el

⁴⁵ Este nuevo programa de investigación que trata de abordar de forma diferente a las metodologías clásicas el estudio de sistemas complejos, como es el caso de los sistemas económicos, ha despertado el interés y la ilusión de muchos investigadores (Epstein & Axtell, 1996), aunque también ha recibido importantes críticas (Horgan, 1995) además del escepticismo de no pocos investigadores (Silverberg & Verspagen, 2005).

⁴⁶ La formalización de la naturaleza estocástica de los procesos de innovación es a nuestro juicio un campo de estudio muy interesante. No existe un consenso claro sobre cómo ha de modelizarse la distribución de probabilidad de la innovación en un modelo evolucionista. Dependiendo del estudio cada investigador realiza sus propias hipótesis, muchas veces de difícil comprobación empírica, y cuya suposición condiciona significativamente los resultados.

cambio como un proceso endógeno y complejo que depende de la diversidad de características, comportamientos y relaciones de los agentes económicos⁴⁷.

El objetivo de una investigación evolucionista no ha de centrarse en describir con acierto las observaciones económicas, que bajo la perspectiva evolucionista siempre estarán sujetas a incertidumbre, sino que ha de orientarse a explicar los mecanismos que gobiernan el proceso evolutivo (Andersen, 1994, 13-14).

A la hora de investigar los mecanismos evolutivos nos encontramos con dificultades de distinta naturaleza. En primer lugar, por la propia complejidad del sistema económico, que puede ser abordada desde diferentes niveles de detalle y agregación. Esto condiciona significativamente los resultados y da origen a diferentes aproximaciones evolucionistas, dependiendo del objeto y alcance del estudio, que pueden estar o no en desacuerdo unas con otras⁴⁸.

En segundo lugar, y no menos importante, porque muchos de los procesos evolutivos tocan conceptos y teorías de diferentes disciplinas científicas, tales como la Economía, la Psicología, la Sociología, la Historia o la Geografía, tradicionalmente separadas y que hacen muy complicado cualquier intento de integración en una misma línea de investigación.

Andersen (1994, 1-13) sostiene que todo programa de Economía Evolucionista ha de caracterizarse por:

- Una perspectiva de población: en la línea ya comentada de Alchian (1950) de introducir el marco evolucionista de la biología que contempla los elementos básicos de diversidad, selección y desarrollo.

⁴⁷ Es decir que la Economía Evolucionista acepta la complejidad del sistema económico y pretende abordarla como tal. Con tal ambicioso objetivo no es de extrañar que la Economía Evolucionista al día de hoy es una disciplina por realizarse, tanto en sus fundamentos como en su metodología e instrumentos de investigación.

⁴⁸ Hay que reconocer a la teoría económica clásica su capacidad no solo de ofrecer un marco analítico riguroso, sino coherente y capaz de explicar consecuentemente diferentes problemas económicos. Dentro de un programa evolucionista nos encontramos con una primera decisión, para nada inocua, como es la unidad de selección y de evolución: Axtell (1999) utiliza el individuo, Winter (2000) la empresa y Silverberg (2007) la tecnología, por citar algunos ejemplos.

- Una orientación empírica: fiel a la visión de Schumpeter de prestar atención a los casos reales como fuente de investigación y no como excepciones a explicaciones formales.
- Una mezcla entre la aproximación algorítmica, como las sociedades artificiales de agentes, y la analítica y matemática.
- Un diálogo con la vieja tradición evolucionista: aunque en forma de modelos verbales (no formales) sus aproximaciones e intuiciones pueden aportar importantes pistas en los estudios actuales.

Nosotros añadimos a esta lista que también es necesario un diálogo con la teoría económica clásica y con los importantes avances que en este campo se han venido realizando en los últimos años en teoría de crecimiento (Barro & Martin, 1995). La Economía Evolucionista no puede menospreciar porque sí a la corriente económica clásica, de igual forma que esta última tampoco tendría que desechar sin más los planteamientos evolucionistas y los interesantes avances que en materia de sociedades artificiales de agentes se vienen realizando⁴⁹.

2.2 Principales conceptos evolucionistas

En una definición general y sencilla podemos decir que en un modelo económico evolucionista debe haber una población heterogénea de individuos que compiten por algún recurso escaso, con mayor o menor acierto en función de sus cualidades individuales, interactúan y son capaces de desarrollar nuevas cualidades. Desde nuestro punto de vista, todo modelo evolucionista se caracteriza por tres propiedades: diversidad, selección y desarrollo, que vamos a explicar a continuación.

2.2.1 Fundamentos de la evolución: diversidad, selección y desarrollo

En todo proceso económico evolucionista (ver Figura 14) debieran distinguirse claramente estos tres elementos (Metcalfé, 1996):

⁴⁹ El corsé matemático clásico no nos ha de impedir utilizar nuevas metodologías y herramientas, como las sociedades artificiales de agentes, cuando queremos explicar con acierto muchos de los fenómenos económicos reales en los que las hipótesis económicas clásicas no se cumplen.

1. Una *diversidad* de características y comportamientos de los agentes. No todos ellos hacen lo mismo (productos, servicios) sino que los hacen de forma distinta (conocimiento, rutinas, capacidades, tecnología); y estas diferencias tendrán significación en los procesos de selección.
2. Unos procesos de *selección* que generan patrones de cambio económico a partir de esa diversidad. El mercado alberga los mecanismos de selección, favoreciendo la expansión de aquellos agentes más rentables y eficientes que replican⁵⁰ sus características, y condenando los menos rentables⁵¹.
3. Unos procesos de *desarrollo* que generan nueva diversidad. La innovación en productos y servicios o en métodos de producción desempeña este papel generador de diversidad. También en los procesos de replicación se puede generar nueva diversidad (mutación).

Conviene señalar que no debemos estudiar estos constituyentes evolucionistas de forma independiente. Por ejemplo, los procesos de selección y de desarrollo de nueva diversidad suelen estar relacionados: aquellas empresas que obtienen mayores beneficios (selección) disponen de más recursos para la investigación (desarrollo), y por lo tanto más probabilidades de desarrollar innovaciones (nueva diversidad).

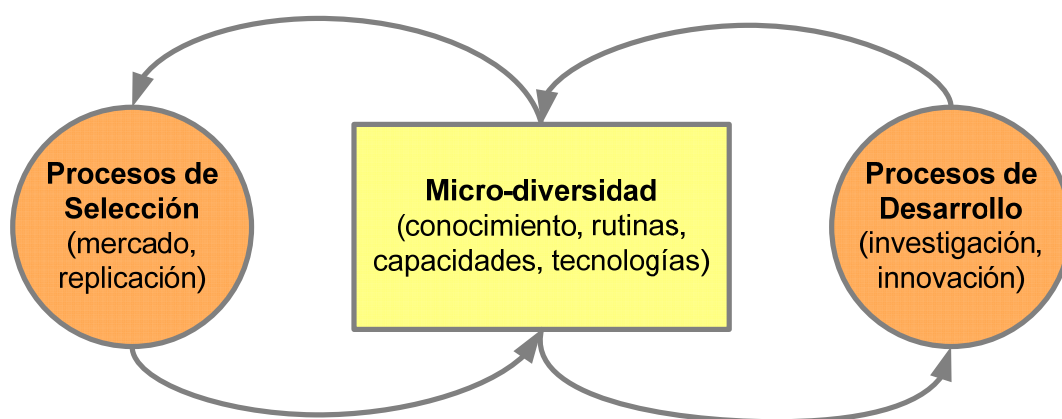


Figura 14. Elementos de un modelo económico evolucionista (elaboración propia).

⁵⁰ Algunos autores denominan a estos procesos como *herencia*, sin embargo en nuestra opinión el término *replicación* describe mejor los procesos de transmisión de conocimiento de los agentes económicos.

⁵¹ El papel del mercado como motor de selección es bastante más complejo de lo que puede pensarse a priori, puesto que responde a reglas y normas establecidas por diferentes instituciones, y son en definitiva expresión del conflicto de intereses entre los distintos agentes públicos y privados.

2.2.2 Selección: ecuación del replicador

Los procesos de selección suelen ser formalizados matemáticamente mediante la *ecuación del replicador*, que proviene de la aproximación evolucionista a la biología de Fischer (1930). Aquellos modelos evolucionistas que utilizan una aproximación algorítmica no suelen explicitar esta ecuación aunque en algunos casos sí puede obtenerse, como por ejemplo para los modelos de Nelson y Winter (Andersen, 1994).

El objeto de esta ecuación es representar la dinámica de selección de aquellos individuos que mejor *fitness* tienen, que en términos evolutivos significa mejor adaptación. Supondremos una población de n clases de agentes, que en términos biológicos podríamos llamar especies. El peso relativo de cada especie en la población está representado por el vector $\underline{s} = (s_1, \dots, s_n)$. Vamos a expresar la dinámica de la variación de cada uno de estos pesos mediante la *ecuación del replicador*:

$$\dot{s}_k = s_k (g_k - \bar{g}), \quad k = 1, \dots, n \quad (2.1)$$

Donde g_k representa el ratio de crecimiento de la especie i -ésima en la población, también llamada función de *fitness*, y $\bar{g} = \sum s_k g_k$ el ratio promedio de crecimiento de la población.

La Ec.(2.1) nos dice que aquella especie que crece por encima del valor promedio incrementa su peso en la población, al igual que crece la influencia de sus características individuales en la población. Indirectamente esta ecuación nos muestra que aquellas especies con crecimientos menores al promedio de la población disminuyen su peso en ella hasta desaparecer.

Si los ratios de crecimiento g_k son constantes entonces obtenemos la *ley fundamental de Fischer*: la selección siempre actúa en la dirección de incrementar el promedio de crecimiento de la población:

$$\dot{\bar{g}} = \sum_{k=1}^n \dot{s}_k g_k = \sum_{k=1}^n s_k (g_k - \bar{g}) g_k = \text{var}(\bar{g}) \geq 0 \quad (2.2)$$

Lo que ocurre es que, en muchas ocasiones, no podemos garantizar que estas funciones de *fitnesses* g_k sean constantes y no dependan, por ejemplo, de los propios pesos de las especies s_k , lo que complica significativamente el análisis y los resultados.

Muchos modelos económico-evolucionistas representan estas funciones en términos de competitividad del producto, mediante la introducción de variables como el precio del producto, su calidad, o cualquier otra característica. Otros modelos describen un escenario con un producto homogéneo indiferenciado y suponen que las diferencias se encuentran en la productividad y el coste unitario de producción de cada empresa (Silverberg & Verspagen, 2005).

2.2.3 Desarrollo: investigación e innovación

La ecuación del replicador anterior no representa por sí misma un sistema evolutivo si no especificamos cómo cambian y cómo son creadas las características de los individuos, que juegan un papel importante en el proceso de selección.

Siguiendo con el ejemplo anterior, vamos a suponer que existe un conjunto de características de selección que poseen los individuos y que representamos por el vector $\underline{x} = (x_1, \dots, x_m)$. Supongamos que centramos nuestro interés en una de estas características x_j , el promedio en la población será $\bar{x}_j = \sum s_k x_{kj}$, que variará en el tiempo siguiendo la ecuación del replicador:

$$\dot{\bar{x}}_j = \sum_{k=1}^n \dot{s}_k x_{kj} + \sum_{k=1}^n s_k \dot{x}_{kj} = \sum_{k=1}^n s_k (g_k - \bar{g}) x_{kj} + \sum_{k=1}^n s_k \dot{x}_{kj} \quad (2.3)$$

El primer término de la ecuación anterior representa la variación debida al proceso de selección (primera ecuación del replicador), mientras que el segundo representa el proceso de desarrollo que crea nuevos valores de la característica x_j . Está claro que sin este segundo término el proceso evolutivo tendería a un estado final donde sobreviviría únicamente la especie con mayor fitness.

Las ecuaciones anteriores conforman un sistema no lineal que únicamente bajo hipótesis muy restrictivas puede resolverse analíticamente. Sin embargo, esta formulación matemática heredada de la biología evolutiva no nos ha de apartar del

proceso económico evolutivo al cual trata de representar, y que puede implementarse de forma no analítica mediante algoritmos.

En un fenómeno económico, la población está formada por los agentes económicos (individuos, empresas), el replicador del proceso de selección está sumergido normalmente en el mercado, y el replicador de desarrollo de nueva diversidad representa el conjunto de procesos replicación, imitación e I+D+i.

Parece evidente que conforme crece la complejidad del sistema económico evolutivo que queremos estudiar, resulta más conveniente utilizar una formulación algorítmica, como por ejemplo la que se propone por la Economía Computacional basada en Agentes (*Agent-Based Computational Economics*), que además nos permite representar más fielmente la diversidad de entidades, así como los procesos de selección y desarrollo que ocurren en los fenómenos económicos reales.

2.2.4 Micro-diversidad: rutinas y conocimiento

En todo fenómeno evolucionista partimos de los individuos y volvemos a los individuos. La diversidad de la población es el resultado de los procesos de selección y desarrollo, y a su vez la diversidad condiciona los procesos evolutivos. En términos económicos cuando hablamos de diversidad nos referimos a todos los agentes económicos, pero especialmente a las empresas.

La Economía clásica describe a la empresa como un agente optimizador que dispone de información perfecta y exhibe un alto grado de comportamiento estratégico. Por el contrario, la Economía Evolucionista considera a la empresa como una organización compleja que toma decisiones en base a sus capacidades, conocimiento y experiencia. Esta descripción del comportamiento de la empresa se sintetiza en el concepto evolucionista de *rutinas*.

Las rutinas que describen el comportamiento de una empresa son expresión del conocimiento de la organización que ha ido aprendiendo y modelando de acuerdo a su

experiencia y trayectoria histórica⁵². Bajo este concepto se integran no solo las reglas de decisión, más o menos complejas, sino también el conocimiento de la empresa, pues la *rutinización* de las actividades es un importante medio de almacenamiento de conocimiento⁵³.

A veces, las rutinas pueden ser complejas de modelar, resultando más fácil observar los resultados (medidos por ejemplo en términos de productividad). Pensemos, por ejemplo, en todas las relaciones formales e informales de una organización, así como las reglas de comportamiento que con el paso del tiempo han ido dando forma a su cultura. En otras ocasiones, las rutinas pueden ser descritas fácilmente. Por ejemplo, las rutinas que describen lo que se debe hacer ante una ruptura del stock de materia prima, o el gasto en I+D para el siguiente ejercicio.

La naturaleza del conocimiento de las empresas tiene una directa influencia en los procesos de replicación. Un conocimiento tácito requiere de interacciones personales para su difusión y consecuentemente de proximidad geográfica y social (Santos *et al.*, 2007b), mientras que un conocimiento codificable puede viajar lejos y más rápidamente, pudiendo ser replicado por más individuos.

2.2.5 Dependencia histórica

La principal característica de todo proceso evolutivo es que es dinámico, está en continuo movimiento. La complejidad de los sistemas económicos ocasiona que el desarrollo y evolución de los mismos esté condicionada por las condiciones iniciales y los diferentes acontecimientos que van ocurriendo. Esta idea de dependencia del pasado es recogida en el concepto de *dependencia histórica* o *path dependence*: la historia y los pequeños sucesos condicionan el resultado final.

Desde un punto de vista puramente matemático esta dependencia histórica es producto de la naturaleza no ergódica del sistema. Es decir, que a un observador le resulta imposible predecir con total determinación cuál será el estado que finalmente

⁵² Una definición de rutina la encontramos en (Cohen *et al.*, 1996): “una capacidad ejecutable de actuación en un determinado contexto, que ha sido aprendida por una organización en respuesta a presiones selectivas del entorno”.

⁵³ Esta visión de la empresa se corresponde con la aproximación “behavioralistas” de Simon (1959).

alcance el sistema. Es importante tener en cuenta esta propiedad porque no siempre todo modelo evolucionista ha de ser no ergódico, sino que bajo determinadas combinaciones de sus parámetros puede exhibir un comportamiento totalmente determinista.

Un ejemplo de todo esto lo encontramos en el trabajo de Arthur (1989), donde se hace una interesante aproximación formal al problema de la *dependencia histórica* y su relación con los rendimientos crecientes en el problema de la evolución tecnológica. Arthur propone un modelo en el que las empresas secuencialmente han de decidir entre dos tecnologías presentes en el mercado, para lo cual tienen en cuenta sus preferencias naturales y los beneficios que en ese momento les aporta cada una. Los rendimientos de escala hacen que el *pay-off* que obtiene una empresa por utilizar una tecnología dependa directamente del número de empresas que actualmente la utilizan.

Este sencillo modelo permite explicar fenómenos de *lock-in*, en el que finalmente todas las empresas optan por una tecnología aunque no sea la más eficiente. Además, pone de manifiesto como en muchos fenómenos económicos reales la evolución histórica, plagada de sucesos aleatorios, determina un resultado final en muchos casos imposible de predecir.

2.3 Modelos evolucionistas de dinámica industrial

El objetivo de esta tesis es estudiar los fenómenos de aglomeración industrial, que en nuestra opinión no deberían analizarse sin tener en cuenta la dimensión evolutiva de la industria. Es por esto por lo que nos parece indispensable hacer una pequeña síntesis de los principales modelos evolucionistas de dinámica industrial. Podemos adelantar que en la mayoría de los modelos que vamos a revisar se obvia la dimensión espacial o si la tienen en cuenta es de forma tangencial para introducir algún efecto de dependencia por proximidad entre agentes económicos (Jonard & Yildizoglu, 1998).

A pesar de la diversidad de aproximaciones que encontramos en la literatura económica evolucionista, muchos de ellas comparten una base heredada de los primeros modelos propuestos por Nelson y Winter (1982). Por esta razón hemos decidido organizar esta sección describiendo el modelo de dinámica industrial propuesto originalmente por Nelson y Winter (1982, 275-307), para después ir ampliándolo con aquellas contribuciones que a nuestro juicio nos parecen más relevantes.

2.3.1 Modelo de industria evolutiva de Nelson y Winter

El corazón de la familia⁵⁴ de modelos propuestos por Nelson y Winter tiene un claro fundamento microeconómico que se caracteriza fundamentalmente por las siguientes hipótesis (Andersen, 1996):

- Las empresas poseen información imperfecta y toman decisiones óptimas localmente.
- El comportamiento de las empresas está representado por la tecnología productiva que emplean en cada periodo, caracterizada por una determinada productividad y un conjunto de sencillas rutinas o reglas de decisión (innovación, imitación, inversión).
- Las empresas pueden imitar las rutinas de sus competidores o innovar por sí mismas.
- Los procesos de innovación e imitación dependen en gran medida de la propia evolución histórica de cada empresa y de la industria, aunque se permite introducir cambios exógenos debidos al avance de la ciencia.
- Los procesos de búsqueda (imitación e innovación) tienen una naturaleza estocástica que condiciona la evolución de la industria y acentúan la dependencia histórica.

Vamos a revisar las claves del modelo base de Nelson y Winter desde las dimensiones evolucionistas de diversidad, selección y desarrollo ya comentadas.

Diversidad

Todas las empresas fabrican un producto homogéneo, y por lo tanto indiferenciado en el mercado, utilizando una función de producción de Leontieff⁵⁵ bajo

⁵⁴ La estructura de los modelos propuestos por Nelson y Winter comparten un esqueleto común, que llamaremos *modelo base de Nelson y Winter*, que revisamos en esta sección. Nelson y Winter particularizan este modelo base para explicar diferentes fenómenos económicos: la conocida serie de crecimiento económico de US de Solow (Nelson & Winter, 1982, 206-233), la dinámica de competición y cambio tecnológico entre innovadores e imitadores (Nelson & Winter, 1982, 275-307), el proceso de concentración industrial bajo competición de Schumpeter (Nelson & Winter, 1982, 308-328) y una revisión entre la eficiencia estática y la eficiencia dinámica propuesta originalmente por Schumpeter (Nelson & Winter, 1982, 329-354). Además de en la obra original de Nelson y Winter (1982) podemos encontrar una brillante revisión de estos modelos en (Andersen, 1996), donde se acentúa y explica una dimensión muy importante de los mismos que es la algorítmica.

rendimientos constantes de escala, expresada en la Ec.(2.4). $A_i(t)$ representa la productividad del capital que vendrá determinada por la tecnología que utiliza la empresa, y $K_i(t)$ el stock de capital de la misma. La cantidad que fabrica la empresa i es:

$$Q_i(t) = A_i(t)K_i(t) \quad (2.4)$$

El resto de los parámetros de la empresa, que no son tratados como variables evolutivas, son iguales para todas las empresas: los costes por unidad de capital de producción c , los costes de búsqueda por innovación r^{in} y de búsqueda por imitación r^{im} .

Selección

El proceso de selección se hace a nivel de empresa (*unida de selección*) teniendo en cuenta la productividad (*característica de selección*) de la tecnología que cada una emplea, y que otorga beneficios o pérdidas que modifican consecuentemente el stock de capital⁵⁶. El precio del producto $p(t)$ se calcula teniendo en cuenta una función de demanda (exógena) en la industria.

$$p(t) = h(Q(t)); \quad Q(t) = \sum_{i=1}^{n(t)} Q_i(t) \quad (2.5)$$

Tras un ejercicio económico (paso de tiempo secuencial en la simulación) cada empresa decide cómo invertir, y por lo tanto actualizar su stock de capital $K_i(t+1)$, mediante una sencilla regla de decisión (regla de inversión) que compara la inversión deseada $I_i^{deseado}(t)$ con la inversión máxima $I_i^{max}(t)$, escogiendo la menor de ellas:

$$K_i(t+1) = K_i(t) \min \{ I_i^{max}(t), I_i^{deseado}(t) \} \quad (2.6)$$

La inversión máxima, Ec.(2.7), depende de los beneficios obtenidos en el ejercicio, Ec.(2.8), la tasa de depreciación del capital δ y la financiación bancaria nueva b que se obtiene si se tienen beneficios.

$$I_i^{max}(t) = \delta + (1+b)\pi_i(t) \quad (2.7)$$

⁵⁵ La proporción de capital y mano de obra empleada es fija.

⁵⁶ Las empresas que reducen su stock de capital por debajo de un umbral son eliminadas de la industria.

$$\pi_i(t) = p(t)A_i(t) - (c + r^{in} + r^{im}) \quad (\text{por unidad de capital}) \quad (2.8)$$

La inversión deseada también depende de la depreciación de capital δ y la relación entre un margen deseado⁵⁷, y el margen real que tiene la empresa fabricando con la tecnología que posee al precio actual de mercado.

$$I_i^{\text{deseado}}(t) = \delta + 1 - \frac{mg_i^{\text{deseado}}(t)}{mg_i^{\text{real}}(t)} \quad (2.9)$$

$$mg_i^{\text{real}}(t) = \frac{p(t)A_i(t)}{c} \quad (2.10)$$

Desarrollo

La introducción de nueva diversidad proviene principalmente de los cambios tecnológicos en cada empresa (*unidad de evolución*), que incrementan la productividad del capital $A_i(t)$. Estos cambios son resultado de las actividades de búsqueda (I+D) que realicen las empresas:

- Una búsqueda local, propiamente la actividad de innovación, que puede dar origen (*mutación*) a una nueva tecnología no conocida en la industria hasta ese momento.
- Una búsqueda en la industria, que conforma una estrategia de imitación o *benchmarking*, por la que una empresa puede adquirir una tecnología ya explotada por un competidor.

Cada empresa puede llevar a cabo en cada ejercicio una de las dos búsquedas, en cuyo caso hablamos de empresas innovadoras puras o imitadoras puras, o ambas actividades simultáneamente.

Este proceso de búsqueda (I+D) tiene una naturaleza aleatoria que Nelson y Winter modelan de una forma un tanto particular, en una secuencia de sucesos aleatorios de dos etapas. Cada empresa dedica una parte de su capital a las tareas de I+D (innovación y/o imitación según estrategia):

⁵⁷ La decisión sobre el margen deseado varía según modelos en función del grado de agresividad que se quiere dotar a las empresas, y que no describimos formalmente para no complicar en exceso la explicación.

$$\begin{aligned} K_i^{in}(t) &= r^{in} K_i(t) \\ K_i^{im}(t) &= r^{im} K_i(t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

El éxito o fracaso de las actividades de I+D de las empresas ($x_i^{in}(t) \in \{1,0\}, x_i^{im}(t) \in \{1,0\}$) vienen determinados por sendas distribuciones *binomiales* de parámetros fijos⁵⁸: d^{in} probabilidad de éxito en innovación por unidad de capital, y d^{im} probabilidad de éxito en imitación por unidad de capital.

$$\begin{aligned} p(x_i^{in}(t) = 1) &= d^{in} K_i^{in}(t) \\ p(x_i^{im}(t) = 1) &= d^{im} K_i^{im}(t) \end{aligned} \quad (2.12)$$

El éxito en las actividades de I+D ofrece a la empresa una oportunidad: en el caso de innovación está consiste en una nueva lotería que determina la productividad del capital de la nueva tecnología, y que se modela mediante una distribución de probabilidad normal, Ec.(2.13); y en el caso de imitación la oportunidad se traduce en copiar la mejor tecnología del momento en la industria, Ec.(2.14).

$$A_i^{in}(t) = N(\mu^{in}(t), \sigma) \quad (2.13)$$

$$A_i^{im}(t) = \max \{A_j(t)\}_{j=1 \dots n(t)} \quad (2.14)$$

Finalmente la empresa decide qué tecnología utilizará en el siguiente periodo siguiendo una simple regla de decisión, Ec.(2.15).

$$A_i(t+1) = \max \{A_i(t), A_i^{in}(t), A_i^{im}(t)\} \quad (2.15)$$

Fenómenos económicos explicados

La familia de modelos de Nelson y Winter de dinámica industrial bajo competición de Schumpeter, construida sobre el modelo base descrito, permiten (Andersen, 1996):

⁵⁸ El número de proyectos de I+D exitosos en la industria puede ser aproximado mediante una distribución de *Poisson* siempre y cuando las probabilidades de la Ec.(2.12) sean suficientemente pequeñas. Para asegurar este último requerimiento Nelson y Winter imponen un horizonte temporal de las simulaciones pequeño, de tal forma que la evolución del capital de las empresas (monótono creciente) esté dentro de un rango limitado.

- Explicar por qué las industrias se caracterizan por empresas que difieren en sus estrategias de innovación e imitación.
- Explicar la distribución de los tamaños de las empresas bajo diferentes regímenes tecnológicos.
- Analizar el efecto de la financiación en la evolución industrial.

Limitaciones del modelo

Sin embargo, este modelo, así descrito, presenta algunas limitaciones que han sido completadas posteriormente por diferentes autores mediante extensiones a este modelo (Jonard & Yildizoglu, 1998; Pajares, 2001), como por ejemplo:

- Las empresas no tienen capacidad de adaptar sus políticas de I+D, gobernadas por los parámetros r^{in} , r^{im} .
- No se contemplan las externalidades de conocimiento o knowledge spillovers que muchos autores consideran muy importantes en cualquier fenómeno de innovación.
- Simplifica el mercado y los procesos de selección al considerar un único producto industrial idéntico para todas las empresas.
- No contempla la dimensión espacial de la industria, y los posibles efectos que ésta puede tener en la dinámica industrial.

2.3.2 Aproximación algorítmica del modelo de Nelson y Winter

La característica fundamental del modelo base de Nelson y Winter es que construye la evolución de la industria sobre un *proceso de Markov*. El estado de la industria en un momento t queda descrito por el stock de capital y las reglas de comportamiento (inversión, innovación e imitación) del conjunto de empresas que operan. El estado posterior $t+1$ dependerá de la situación anterior y de las decisiones de las empresas, y los acontecimientos estocásticos que estas decisiones promuevan.

La naturaleza markoviana del modelo nos permite describirlo de forma algorítmica, tal y como se explicaría en un contexto de simulación computacional (ver Figura 15).

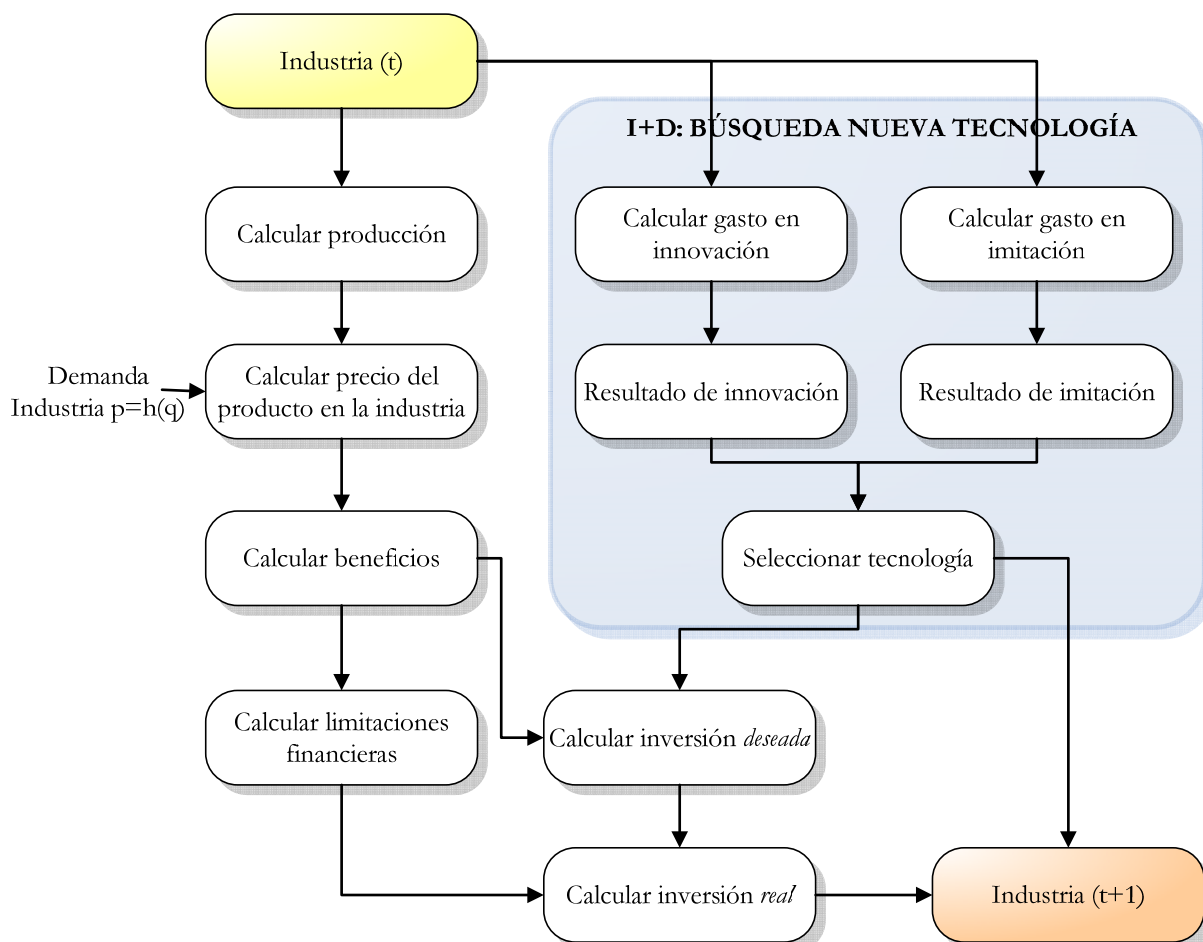


Figura 15. Descripción algorítmica del modelo de dinámica industrial de Nelson y Winter (elaboración propia a partir de la versión de Andersen (1996)).

2.3.3 Extensión de Winter: regímenes tecnológicos

Las industrias reales no evolucionan todas de forma semejante ni el cambio tecnológico opera igualmente en ellas. Algunas de las características que diferencian el desarrollo tecnológico de muchas industrias son la intensidad (gasto) en I+D de las empresas, las barreras de entrada a nuevas empresas, las fuentes de conocimiento (públicas o privadas), la naturaleza del conocimiento (tácito o codificable), la protección de los derechos de las innovaciones (apropiabilidad, patentes), etc.

Una forma de captar, y por lo tanto modelar parte de esta diversidad industrial es introduciendo el concepto de *régimen tecnológico*: conjunto de características tecnológicas que afectan a las fuentes del conocimiento, su creación, aprendizaje y aplicación, comunes en diferentes industrias en las que son compartidas por todos los agentes económicos independientemente de la diversidad de comportamientos que

desarrollen. Desde el punto de vista de un modelo evolutivo este concepto se puede traducir en la definición de un conjunto de escenarios de simulación, caracterizados por los valores de algunos de los parámetros del modelo, tal y como propuso Winter en su trabajo (1984).

Winter (1984) extiende el modelo base (Nelson & Winter, 1982, 275-307) para estudiar dos escenarios de desarrollo económico y tecnológico descritos informalmente por Schumpeter, y que llama *entrepreneurial regime* y *routinized regime*. La diferencia entre estos dos regímenes radica en las fuentes y procesos de innovación. En el primero de ellos la innovación ocurre principalmente a través de la entrada de nuevas empresas, lideradas por la figura del emprendedor, mientras que en el segundo la innovación es liderada por las empresas existentes en un proceso de crecimiento acumulativo.

Además, el modelo de Winter incorpora otras novedades interesantes como las entradas y salidas de empresas en la industria, y el cambio adaptativo de las políticas de I+D.

Entrada y salida de empresas en la industria

Se define para cada empresa una variable *rendimiento* $X_i(t)$, Ec.(2.16), que cuantifica lo bien que está desarrollando sus actividades teniendo en cuenta no sólo los beneficios actuales sino también los pasados (según el parámetro de memoria θ).

$$X_i(t+1) = \theta X_i(t) + (1-\theta)\pi_i(t) \quad 0 < \theta < 1 \quad (2.16)$$

La regla de salida de la industria de una empresa es bastante intuitiva: una empresa desaparece si su capital cae por debajo de un mínimo $K_i(t) < K_{\min}$, o si su rendimiento desciende por debajo de otro mínimo $X_i(t) < X_{\min}$, ambos umbrales arbitrariamente escogidos.

La entrada de nuevas empresas en un periodo se formaliza mediante un proceso de *Poisson* de parámetros $M(t)$ y $N(t)$, que corresponden al número esperado de nuevas empresas, imitadoras e innovadoras, en la industria. Winter supone que en la industria existe una actividad de I+D externa, diferente a la investigación individual de las empresas, que agrupa las iniciativas de gobiernos, instituciones públicas como

Universidades y Centros Tecnológicos, Fundaciones, así como los posibles resultados de otras industrias relacionadas.

Esta fuente externa de innovaciones se modeliza mediante un proceso estocástico de dos etapas, muy semejante al de las empresas constituidas que ya hemos descrito. Primero supondremos que en cada periodo se invierte unos recursos económicos en actividades de innovación e imitación, que determinan los parámetros de las distribuciones de Poisson correspondientes, Ec.(2.17).

$$M(t) = a^{im} E^{im}(t) \quad N(t) = a^{in} E^{in}(t) \quad (2.17)$$

En cada periodo se extrae un valor de estas distribuciones que corresponde al número de posibles candidatos a formar una nueva empresa en el periodo siguiente. Luego, cada posible candidato evalúa una nueva tecnología $A_e(t)$ (ver Tabla 1), y finalmente se constituye como empresa si sus resultados esperados, Ec.(2.8), son mayores que las barreras de entrada en la industria c_e .

Cambio adaptativo en las políticas de I+D

En el modelo original de Nelson y Winter las estrategias de búsqueda, representadas por la proporción de gasto en I+D (r_i^{in}, r_i^{im}) , son fijas para todas las empresas durante la simulación. Winter (1984) introduce la posibilidad de que cada empresa cambie su estrategia de búsqueda en función de los resultados en el mercado.

La regla de adaptación es sencilla: si los beneficios económicos son menores que los beneficios promedios de la industria la empresa tratará de cambiar de estrategia. La nueva estrategia se calcula en función de la estrategia actual y el promedio en la industria, Ec.(2.18).

$$\begin{aligned} r_i^{\{in,im\}}(t+1) &= r_i^{\{in,im\}}(t) \quad \text{si } X_i(t) \geq \bar{\pi}(t) \\ r_i^{\{in,im\}}(t+1) &= (1-\beta)r_i^{\{in,im\}}(t) + \beta\bar{r}_i^{\{in,im\}}(t) + u \quad \text{si } X_i(t) < \bar{\pi}(t) \end{aligned} \quad (2.18)^{59}$$

⁵⁹ La variable u , que sigue una distribución de ruido blanco, introduce un factor de variabilidad o error en el proceso de adaptación de las estrategias de I+D.

Siendo β un parámetro de memoria y u una variable aleatoria que sigue una distribución de ruido blanco.

Modelización de los regímenes tecnológicos

Como ya hemos señalado, la gran novedad en el modelo de Winter (1984) reside en la modelización del concepto de *régimen tecnológico*, con el que pretende diferenciar la naturaleza y fuente de la innovación tecnológica: la propia empresa en un proceso acumulativo, o un conocimiento público externo a la empresa. La Tabla 1 recoge la parametrización que caracteriza a ambos escenarios de simulación y que se resume en:

- La naturaleza de innovación de las fuerzas externas y de las empresas: en el *entrepreneurial regime* los recursos externos empleados en I+D, E^{in} , son grandes, aunque las probabilidades de innovación a^{in} son pequeñas, mientras que en el *routinized regime* ocurre al revés.
- La fuente de innovación de las empresas representada por la distribución de oportunidades tecnológicas: en el *entrepreneurial regime* la media de la distribución *log-normal* depende de una productividad base (pública) $L(t)$, que va creciendo exógenamente con el tiempo, mientras que en el *routinized regime* el parámetro responde al valor medio de la productividad base y la productividad de la propia empresa.

Tabla 4. Parámetros que caracterizan los regímenes tecnológicos (Winter, 1984).

<i>Entrepreneurial</i>	<i>Routinized</i>
$(E^{in} = 2, a^{in} = 0,025)$	$(E^{in} = 0,2, a^{in} = 0,25)$
$Ln(A_i(t)) \rightarrow N(\ln(L(t)), \sigma)$	$Ln(A_i(t)) \rightarrow N(\frac{\ln(L(t)) + \ln(A_i(t))}{2}, \sigma)$

2.3.4 Modelo AL de Andersen y Valente

Una de las características del modelo base de Nelson y Winter es que no es un modelo económico completo, pues la demanda del producto se introduce como una función exógena. Andersen y Valente (2002) ofrecen un modelo evolucionista más

completo que bautizaron como modelo AL ⁶⁰, en el que participan no solo las empresas (que siguen siendo los agentes activos) sino también las familias que ofrecen la mano de obra que necesitan las empresas y generan la demanda del producto industrial.

Bases del modelo

Los autores centran la explicación del modelo en la mano de obra y su productividad, en vez de utilizar el capital como variable explicativa como ocurre en los modelos de Nelson y Winter. Las empresas fabrican un producto homogéneo utilizando como función de producción $Q = AL$, donde la cantidad producida Q depende de la mano de obra contratada L y de la productividad del factor trabajo A , y que como veremos está relacionada con las rutinas y el conocimiento de la empresa.

Andersen y Valente utilizan la siguiente hipótesis: cada empresa disfruta de un *conocimiento* que se concreta en la utilización de un conjunto particular de rutinas caracterizadas por una determinada *productividad*⁶¹. El proceso de selección, por el que aquellas empresas con una productividad superior al promedio en la industria incrementan su cuota de mercado (ecuación del replicador), se explica aquí en base a que estas mismas empresas poseen un conocimiento y un dominio de las técnicas productivas superior a la media.

Análogamente, el proceso de desarrollo, por el que una empresa puede mejorar su productividad, se explica como un proceso de aprendizaje (individual o innovación, de los competidores o imitación) que mejora el conocimiento de la empresa y consecuentemente las rutinas de producción que emplea.

Diversidad

El modelo contiene una población de N familias que ofrecen una unidad de trabajo a las empresas $L = N$, y gastan todos sus ingresos en el producto industrial. Puesto que se impone que el salario nominal por unidad de trabajo es $w = 1$, los

⁶⁰ Las siglas provienen de la función de producción utilizada en el modelo $Q = \text{Productivity} \times \text{Labor} = AL$.

⁶¹ Esta asociación entre conocimiento, rutinas de producción y productividad es puramente conceptual y no se explicita en el modelo, donde únicamente se trabaja con la variable evolutiva productividad A .

ingresos de las familias coinciden en todo momento con el trabajo empleado en la industria.

Además, existe una población inicial de n empresas que utilizan las unidades de trabajo contratadas en un periodo $L_i(t)$ para desarrollar sus actividades. Una parte de la fuerza laboral $L_i^{prod}(t)$ se dedica a la producción, mientras que otra $L_i^{I+D}(t)$ se encarga del I+D.

La capacidad de producción de la empresa⁶² depende del conocimiento del que disfruta, que se computa mediante la productividad por unidad de trabajo $A_i(t)$, y que se expresa mediante la función de *Leontief* de la Ec.(2.19).

$$Q_i(t) = A_i(t)L_i^{prod}(t) \quad \text{con} \quad L_i^{prod}(t) = (1 - r_i)L_i(t) \quad (2.19)$$

siendo r_i la proporción de la fuerza laboral empleada en I+D.

Selección

El mercado del producto se modela de forma muy simple: suponiendo salarios como numerario del modelo⁶³, $w=1$, la demanda coincide con el total de unidades de trabajo contratadas por las empresas $\sum L_i(t)$, y puesto que la oferta está compuesta por el total de unidades fabricadas $\sum Q_i(t)$, el precio del producto es $p(t) = \sum L_i(t) / \sum Q_i(t)$.

Los beneficios de la empresa se calculan de forma sencilla, Ec.(2.20).

$$\pi_i(t) = p(t)Q_i(t) - L_i(t) = p(t)A_i(t)(1 - r_i)L_i(t) - L_i(t) \quad (2.20)$$

Puesto que estamos en una economía cerrada el beneficio de la empresa se destina a contratar nuevas unidades de trabajo en el siguiente periodo, Ec.(2.21).

⁶² Al igual que en los modelos de Nelson y Winter se suponen rendimientos constantes de escala.

⁶³ Lo que significa que el precio del producto siempre está expresado en relación al salario o coste por unidad de trabajo w .

Evidentemente si la empresa tiene pérdidas éstas se traducen en los correspondientes despidos⁶⁴.

$$\Delta L_i(t+1) = L_i(t+1) - L_i(t) = \pi_i(t) \quad (2.21)$$

Desarrollo

Cada empresa divide la fuerza laboral en dos, de acuerdo con la estrategia de investigación de la empresa representada por la fracción de la mano de obra r_i empleada en I+D. Así, una parte desarrolla las actividades propias productivas ya comentadas:

$$L_i^{prod}(t) = (1 - r_i)L_i(t) \quad (2.22)$$

Y la otra las actividades de búsqueda o I+D, orientadas a aprender y mejorar la productividad de la empresa:

$$L_i^{I+D}(t) = r_i L_i(t) \quad (2.23)$$

La actividad de búsqueda de una empresa, al igual que en los modelos de Nelson y Winter, se modela como un proceso estocástico en dos etapas. Se define una variable de Bernouilli $z_i(t) \in \{0,1\}$ que vale 1 si la empresa tiene éxito en su investigación, y 0 en caso contrario. Se define la probabilidad de éxito en un periodo mediante la Ec.(2.24), que contempla el esfuerzo en investigación que realiza la empresa⁶⁵.

$$P(z_i(t) = 1) = \lambda L_i^{I+D}(t) \quad (2.24)$$

Si la empresa obtiene éxito en su proceso de búsqueda $z_i(t) = 1$ entonces obtiene unos nuevos resultados en productividad $A_i^{I+D}(t)$ teniendo en cuenta la estrategia de búsqueda que utiliza: innovación (proceso acumulativo en base al propio conocimiento), Ec.(2.25), o imitación (benchmarking de la mejor empresa en la industria), Ec.(2.26).

⁶⁴ Bajo la hipótesis de la función de precios impuesta al modelo se puede demostrar de forma sencilla que el empleo total (y correspondientemente la demanda total) permaneces constantes:

$$\Delta L(t) = \sum \pi(t) = p(t) \sum Q_i(t) - \sum L_i(t) = 0$$

⁶⁵ $1/\lambda$ es el promedio de éxitos por periodo y por unidad de trabajo empleada en investigación.

$$A_i^{I+D}(t) \rightarrow \exp(N(\ln(A_i(t)), \sigma)) \tag{2.25}$$

$$A_i^{I+D}(t) = \max \{A_j(t)\}_{j=1\dots n} \tag{2.26}$$

Finalmente, la empresa decide qué tecnología utilizará en el siguiente periodo siguiendo una simple regla de decisión, Ec.(2.27).

$$A_i(t+1) = \max \{A_i(t), A_i^{I+D}(t)\} \tag{2.27}$$

Aproximación algorítmica

El modelo evolutivo propuesto por Andersen y Valente (2002) se describe preferentemente mediante su aproximación algorítmica, que recogemos en la Figura 16. Al igual que en el modelo base de Nelson y Winter la evolución de la industria queda representada mediante un proceso de Markov, donde el factor trabajo, a diferencia del capital utilizado en el primero, representa la variable de estado principal de las empresas.

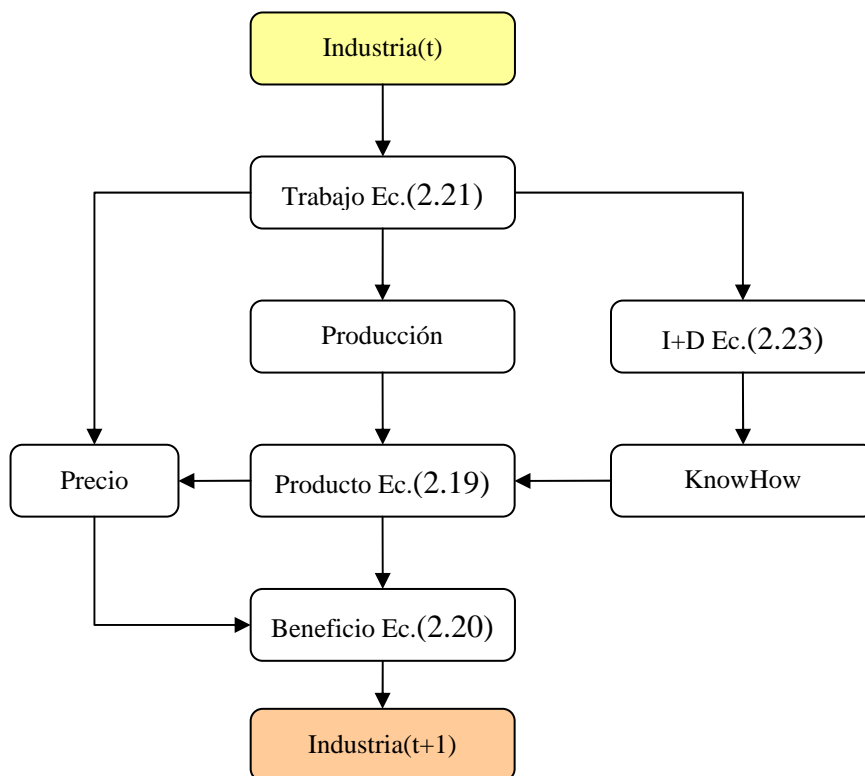


Figura 16. Descripción algorítmica del modelo AI de Andersen y Valente (2002).

2.3.5 Aprendizaje localizado: modelo de Jonard y Yildizoglu

El trabajo de Jonard y Yildizoglu (1998) introduce una interesante novedad al contemplar la dimensión espacial en un modelo evolucionista, si bien su propósito no es el de explicar patrones económico-espaciales como es el objetivo de la Geografía Económica, sino más bien el de introducir un factor de proximidad que condiciona el comportamiento y resultados de los agentes.

Los autores analizan el efecto del aprendizaje (imitación) y las externalidades de red limitadas espacialmente en la evolución de una industria. En todo lo demás, su modelo es muy semejante a los modelos evolucionistas de Nelson y Winter ya descritos.

La principal característica del modelo de industria evolutiva que presentan es que el conjunto de empresas se encuentra disperso en un sencillo *grid* o cuadrícula espacial, que a la postre va a condicionar los procesos de imitación o aprendizaje entre empresas y los rendimientos crecientes que afectan la adopción de nuevas tecnologías.

Aprendizaje localizado y rendimientos crecientes

En la mayoría de los modelos de Nelson y Winter, la dinámica de selección es tan fuerte que, en general, la evolución de la industria tiende a largo plazo a un estado de cuasi-monopolio. En este estado una empresa se adueña del mercado, y una tecnología de producción se impone sobre la diversidad de tecnologías iniciales.

Jonard y Yildizoglu (1998) pretenden analizar cómo y cuándo puede existir una mayor diversidad tecnológica considerando dos importantes fenómenos que afectan a la difusión y adopción de tecnologías: el aprendizaje localizado y los rendimientos crecientes.

En este modelo las empresas están ubicadas aleatoriamente en un *grid* de dos dimensiones de tal forma que la empresa i -ésima tiene asociado una posición en la cuadrícula (x_i, y_i) . Además, la distancia d_{ij} con otra empresa j -ésima se calcula como el menor número de empresas entre medias que las separan.

El grid representa un espacio empresarial que permite introducir un concepto importante en el modelo que es el vecindario de dimensión L . Se define como el conjunto de empresas que se encuentra a una distancia menor o igual a L

$$V_i(L) = \{k \mid d_{ik} \leq L\}.$$

Cada empresa fabrica un producto homogéneo utilizando una función de producción de Leontieff semejante a la ya descrita para el modelo base de Nelson y Winter, Ec.(2.4). A diferencia de éste, la productividad del capital, que llamamos $A(\theta)$, es una función de la tecnología productiva $\theta \in \Theta$ que utiliza la empresa, siendo Θ el espacio de tecnologías de la industria. Este espacio tecnológico se caracteriza por la Ec.(2.28), donde el parámetro β gobierna los saltos entre tecnologías.

$$A(0) = A_0, A(\theta + 1) = A(\theta) + \beta \left(1 + \frac{\theta}{10}\right) \quad (2.28)$$

Además la productividad asociada a una tecnología θ se beneficia por la existencia de externalidades de red localizadas. Así, la productividad efectiva de la empresa i -ésima, $\tilde{A}_i(\theta)$, depende de su productividad intrínseca, $A(\theta)$, y del número de empresas, $n_{i\theta}(\rho)$, que dentro de su vecindario, $V_i(\rho)$, de dimensión ρ utilizan la misma tecnología θ :

$$\tilde{A}_i(\theta) = A(\theta)(1 + \gamma(n_{i\theta}(\rho) - 1)) \quad (2.29)$$

La anterior ecuación nos dice que una empresa puede seguir manteniendo una tecnología antigua e inferior, θ , frente a una nueva tecnología de productividad intrínseca superior $A(\theta) < A(\theta')$, en la medida en que la productividad efectiva de la nueva tecnología, θ' , puede ser menor que la productividad efectiva de la tecnología actual, θ , porque no es utilizada por muchas empresas $\tilde{A}_i(\theta) > \tilde{A}_i(\theta')$.

Al igual que las externalidades de red localizadas, el tradicional proceso de imitación de los modelos de Nelson y Winter se encuentra aquí limitado espacialmente. La regla es muy intuitiva: cada vez que una empresa tiene la oportunidad de imitar (recordemos la distribución de probabilidad de la Ec. (2.12)) selecciona una tecnología a

copiar de entre las empresas del vecindario $V_i(\ell)$ que define su espacio de aprendizaje.⁶⁶

Diversidad y selección en el espacio tecnológico

La limitación espacial del proceso de imitación de las empresas o aprendizaje localizado puede mejorar la eficiencia del proceso de selección en la industria. Como explican Jonard y Yildizoglu (1998), el aprendizaje localizado limita la difusión de las mejores tecnologías haciendo que persistan en la industria una mayor diversidad tecnológica, con una mayor distancia entre empresas líderes y seguidoras. En la industria conviven, al menos inicialmente, un mayor grupo de empresas que opera con tecnologías inferiores, y que el proceso de selección expulsa del mercado rápidamente, reduciendo la diversidad inicial.

A este fenómeno debemos añadir el efecto de los rendimientos crecientes en la adopción de tecnologías, que también están limitados espacialmente. Las externalidades de red suelen tender a estados de *lock-in*, en los que una única tecnología se impone como mejor opción para todas las empresas incluso aunque no sea la tecnología superior (Arthur, 1989). Los autores demuestran que estas externalidades pueden operar de forma distinta, frenando el proceso de selección explicado antes. Bajo esta hipótesis, tecnologías claramente inferiores pueden sobrevivir compitiendo con tecnologías superiores en la medida en que existen clusters de empresas que las comparten beneficiándose mutuamente de ello, haciendo posible que la evolución de la industria tienda a estados de una mayor diversidad tecnológica que la que cabría esperarse.

Jonard y Yildizoglu son capaces de explicar la persistencia de diversidad tecnológica en las industrias mediante el concepto de *localización*, modelado como una restricción espacial del alcance de actuación de los procesos de imitación y rendimientos crecientes. Desde un punto de vista más general, demuestran también cómo es posible introducir positivamente la dimensión espacial en los modelos evolucionistas.

⁶⁶ Los dos grandes parámetros de este modelo son la dimensión del vecindario de externalidades de red ρ y la del vecindario de aprendizaje ℓ . Observar que en el caso de que estas dimensiones ρ y ℓ sean las máximas correspondientes al tamaño del grid, el modelo resultante es idéntico al modelo base de Nelson y Winter.

2.4 Aproximación evolucionista a la Geografía Económica

Cuando en el capítulo anterior introdujimos la Nueva Geografía Económica, dijimos que esta línea de investigación suponía un intento por integrar el espacio en la teoría económica, que tradicionalmente no había tenido en cuenta las cuestiones geográficas.

Algo parecido ocurre con la teoría económica evolucionista, que tampoco ha considerado la dimensión espacial en sus modelos evolutivos, si bien esto resulta comprensible en tanto que como bien señalábamos al comienzo de este capítulo, esta disciplina se encuentra todavía dando sus primeros pasos.

Recientemente han aparecido algunos trabajos que pretenden trasladar la teoría y conceptos evolucionistas al estudio de los problemas económico-geográficos (Boschma & Lambooy, 1999; Boschma & Frenken, 2006a), aunque este esfuerzo investigador es principalmente teórico y faltan propuestas formales (en forma de modelos analíticos o computacionales).

2.4.1 Nueva Geografía Económica, Geografía Económica y Economía Evolucionista

En el capítulo anterior estudiamos los principios del modelo analítico sobre los que la Nueva Geografía Económica ha venido desarrollando sus propuestas en los últimos años. Mencionamos el debate existente entre esta nueva línea de investigación puramente económica y la tradicional corriente con acento geográfico de la *vieja* Geografía Económica (Overman, 2004).

Más allá de esta confrontación de teorías, resulta fácil observar que también muchos de los principios de la Nueva Geografía Económica están en contradicción con los principios evolucionistas que venimos comentando en este capítulo. Esta divergencia tiene su origen principalmente en la visión del sistema económico: la Nueva Geografía Económica lo ve como un sistema en equilibrio y homogéneo, mientras que la Economía Evolucionista subraya su naturaleza dinámica y heterogénea.

Las principales hipótesis de la Nueva Geografía Económica que discrepan significativamente con la teoría evolucionista se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Los agentes económicos son homogéneos: consumidores representados por una función de utilidad agregada y empresas que utilizan la misma tecnología.
- Los agentes son perfectamente racionales: las empresas toman siempre decisiones óptimas y disponen de información perfecta del mercado y sus competidores.
- La visión del sistema económico es estática. Consecuentemente, el análisis se centra en el estudio de los diferentes estados de equilibrio.
- La dimensión espacial se simplifica reduciéndola a una variable de coste de transporte.

En clara oposición a las hipótesis de la Nueva Geografía Económica, algunos autores (Metcalf, 1996) piensan que la complejidad de los fenómenos económico-espaciales no puede ser reducida a un modelo estático de equilibrio, sino que ha de ser entendida como un proceso dinámico y evolutivo, donde la diversidad de los agentes económicos y del espacio geográfico juegan un papel relevante.

Si miramos a la Geografía Económica *tradicional*, nos damos cuenta de que muchas de las cuestiones que ha estudiado tienen mucho que ver con los principios de la Economía Evolucionista, y además, tienen una fácil traducción en términos evolucionistas. Por ejemplo, la pregunta de por qué las regiones difieren en sus capacidades y recursos económicos, se concreta en un programa evolucionista en cuestiones como por qué las regiones difieren en sus capacidades para innovar e imitar nuevas tecnologías, o por qué estas aptitudes no son estables en el tiempo, permitiendo que áreas históricamente importantes decaigan mientras que otras nuevas aparecen y se desarrollan (Boschma & Lambooy, 1999).

En esta coincidencia entre disciplinas, no importa quién descubre a quién, si la Geografía Económica encuentra a la Economía Evolucionista o viceversa. La cuestión fundamental es que, a nuestro juicio, ambas se complementan. A diferencia de lo que ocurre con la Nueva Geografía Económica, que impone importantes restricciones en sus

modelos analíticos que no son compartidas por la corriente de investigación geográfica tradicional, el diálogo entre Economía Evolucionista y Geografía Económica resulta más sencillo.

Partiendo desde posiciones puramente evolucionistas, la incorporación de la dimensión espacial en los modelos evolutivos representa un paso natural en el desarrollo de esta disciplina: desarrollar los conceptos claves evolucionistas como la diversidad y los procesos de selección y desarrollo teniendo en cuenta la dimensión geográfica que les condiciona y la que condicionan. De forma análoga, también nos parece bastante natural el camino inverso: tratar de explicar el crecimiento económico de las regiones como un fenómeno evolutivo que emerge de los procesos de selección y desarrollo que operan en las mismas.

2.4.2 Conceptos evolucionistas en la Geografía Económica

Teniendo en cuenta la dimensión geográfica podemos concretar las tres piezas clave del puzzle evolucionista que introducimos en el apartado 2.2.1 de la siguiente forma:

1. En cuanto a la *diversidad* de características y comportamientos de los agentes, esta diversidad se extiende más allá del entorno puramente económico, abarcando también el entorno social y geográfico en el que descubrimos las redes sociales, la estructura institucional, las infraestructuras, las políticas regionales, etc.
2. Los procesos de *selección* que generan patrones de cambio económico a partir de esa diversidad, también pueden estar condicionados por la variable geográfica, siendo significativamente distintos entre regiones. Pensemos en todos los condicionantes geográficos, sociales y culturales que interfieren en las reglas y normas que regulan los mercados a través de los cuales se materializan las fuerzas de selección.
3. Los procesos de *desarrollo* fuente de nueva diversidad, no pueden ser comprendidos sin tener en cuenta todos los elementos que conforman el sistema de innovación de las regiones: infraestructuras tecnológicas, universidades y centros de investigación, políticas de innovación y transferencia tecnológica, etc.

De forma intuitiva algunos de los principios evolucionistas pueden aportar nuevas interpretaciones a los fenómenos económico-geográficos.

Diversidad, selección y divergencia regional

Frente al paradigma económico clásico de agentes homogéneos y perfectamente racionales, la Economía Evolucionista considera a las empresas como entidades heterogéneas con capacidades y comportamientos diferentes, normalmente modelados bajo el concepto evolucionista de rutina (Nelson & Winter, 1982). Este conocimiento procedimental es difícil de codificar y por lo tanto de imitar por otras empresas (Maskell & Malmberg, 1999a), aunque la proximidad geográfica puede facilitar el la difusión de conocimiento más allá de las fronteras de las empresas mediante *knowledge spillovers*⁶⁷.

Ahora bien, esta diversidad empresarial no suele estar homogéneamente repartida en el espacio geográfico. El efecto proximidad mencionado antes acentúa las diferencias entre regiones en la medida en que las empresas suelen compartir más elementos comunes con sus vecinas que con las de otras localizaciones. Bajo estas hipótesis la divergencia entre regiones surge simplemente del propio proceso de selección, si bien éste opera a nivel de empresas, puede interpretarse en la práctica como una selección entre regiones⁶⁸. Desde esta perspectiva evolucionista el patrón espacial de la evolución de una industria es un resultado esperado del proceso de selección que opera sobre la diversidad de empresas y regiones (Boschma & Lambooy, 1999).

Innovación, oportunidad y aglomeraciones industriales

La innovación suelen ser el origen de muchas de las ventajas competitivas que disfrutan las empresas, así como de las diferencias en los desarrollos económicos de las regiones (Saxenian, 1994). El estudio de cómo la innovación se distribuye geográficamente ha dado origen a una interesante línea de investigación que llamamos Geografía de la Innovación (Feldman, 1994). Siguiendo esta línea, algunos estudios

⁶⁷ Esta difusión de conocimiento entre empresas o *knowledge spillovers* es ampliamente utilizado por la Geografía de la Innovación (Feldman, 1994) y agrupa diferentes medios de difusión, principalmente a través del movimiento de la mano de obra y los contactos personales formales e informales.

⁶⁸ No podemos dejar de señalar la semejanza entre esta interpretación evolucionista de la diversidad como fuente de divergencia regional y el modelo de ventaja competitiva de Hecksher-Ohlin frecuentemente utilizado en la teoría de crecimiento económico y comercio internacional.

empíricos ponen de manifiesto un claro patrón espacial de la innovación: las actividades de I+D tienden a localizarse en clusters en la medida en que las economías basadas en el conocimiento son importantes en una industria (Audretsch & Feldman, 1996).

Para intentar explicar la dimensión espacial de la innovación, debemos comprender todo aquello que la afecta. Los procesos de innovación son por su propia naturaleza inciertos, suceden bajo condiciones de incertidumbre y competitividad empresarial. A pesar del desarrollo que en los últimos años están teniendo las nuevas tecnologías de la información, con el correspondiente impacto en las redes de comunicación y relación de las organizaciones, siguen siendo impredecibles y difíciles de administrar (Pavitt, 2003). La proximidad geográfica puede reducir esta incertidumbre en la medida en que favorece el contacto y el intercambio de conocimiento mediante *knowledge spillovers*.

Conscientes de estas dificultades, muchas empresas deciden ubicarse en aquellas áreas geográficas donde es más factible disponer de la información clave para su actividad innovadora. Aunque las innovaciones no se presentan de forma determinista, parece claro que existe más oportunidad de que aparezcan en aquellas zonas que disfrutan de mayor conocimiento, donde además los costes de transacción correspondientes son más reducidos. Intuitivamente observamos que la innovación y la oportunidad juegan un papel importante en los procesos de concentración geográfica de muchas actividades industriales (Boschma & Lambooy, 1999).

No podemos olvidar que las características de una región pueden condicionar estos fenómenos de innovación y oportunidad. La estructura institucional de las administraciones locales, la presencia de universidades y centros de investigación e institutos de transferencia tecnológica, así como otros elementos que componen la infraestructura tecnológica de una región, determinan las capacidades competitivas de una región, que difícilmente pueden ser copiadas o transferidas de un lugar a otro (Pajares *et al*, 2003b).

Dependencia histórica y evolución industrial

La dependencia histórica también es un elemento a tener en cuenta en la evolución de los fenómenos de aglomeración industrial, que puede actuar de forma

positiva o negativa. En ocasiones un hecho aleatorio, difícilmente predecible, puede ser el germen del desarrollo de una industria en una región. En este sentido muchos trabajos abordan el estudio de la evolución de un cluster industrial, y la secuencia de ocurrencias y eventos históricos que han tenido una influencia significativa en el devenir histórico del mismo (Saxenian, 1994).

Sin embargo no siempre una herencia histórica de éxito económico en una región es una garantía de supervivencia en el futuro. Con el tiempo un cluster industrial inicialmente próspero puede perder su posición de liderazgo y terminar desapareciendo. Una actividad inicialmente exitosa puede ver erosionada su capacidad de generar beneficios conforme el mercado se satura y el conocimiento tecnológico se extiende. Menores rendimientos merman la capacidad para generar innovaciones y ventajas competitivas, a la vez que la madurez del mercado tiende a hacer la actividad más dependiente del coste, con menores márgenes, aumentando el riesgo de la deslocalización hacia otras áreas de costes más reducidos.

A todo esto se puede añadir el efecto negativo, desde un punto de vista evolutivo, de la oposición al cambio existente en muchas regiones. La evolución de una industria puede tender a estados de *lock-in* negativos caracterizados por una rígida estructura social, cultural y económica, así como una fuerte inercia y resistencia al cambio que dificultan la incorporación de innovaciones, sobre todo cuando éstas chocan fuertemente con el modelo tecnológico existente en la industria. Los problemas de adaptación de las viejas regiones industriales, expresión de su falta de capacidad para hacer cosas nuevas, son un claro reflejo de este efecto negativo de dependencia histórica (Boschma, et al 1999).

El espacio en los modelos evolucionistas

Desde una perspectiva evolucionista, el espacio geográfico deja de ser un elemento pasivo para pasar a jugar un papel activo en la dinámica económica porque:

1. Constituye el elemento aglutinador de todos los agentes económicos que operan en él (empresas, gobiernos, instituciones, trabajadores, consumidores, etc.). Es el gran “recogedor” de la diversidad social, económica, política, tecnológica,

cultural que intervienen en los procesos de selección, desarrollo y evolución histórica de las regiones.

2. Representa el entorno donde se materializan los procesos de selección y las economías de aglomeración, en forma de recursos y capacidades que permiten a las empresas situadas en el mismo disfrutar de mayores oportunidades y ventajas competitivas.
3. Acoge los cambios que generan nueva diversidad, a la vez que difunde las innovaciones y el conocimiento en forma de *knowledge spillovers* a través de las redes sociales formales e informales.

2.4.3 De la teoría al diseño de modelos formales

La mayoría de los trabajos sobre Economía Evolucionista y Geografía Económica suelen ser teóricos o de naturaleza empírica, existiendo muy pocos modelos evolucionistas formales que traten de explicar algún fenómeno espacial. En el apartado 2.3.5 introdujimos un primer modelo evolutivo (Jonard & Yildizoglu, 1998) que incorporaba la dimensión espacial, si bien este modelo no persigue explicar la dinámica espacial de una industria sino que más bien utiliza el espacio como un factor limitante de los procesos de imitación y de elección de nuevas tecnologías que dirigen la evolución de la industria.

En esta sección describimos brevemente el trabajo de Arthur que nos parece especialmente interesante en la medida en que caminan en la dirección de diseñar modelos evolucionistas formales que expliquen la dinámica espacial de una industria, en línea con uno de los objetivos de esta tesis.

Rendimientos crecientes y dependencia histórica

Brian Arthur intenta dar una explicación al porqué de algunos de los fenómenos de aglomeración industrial echando mano de su trabajo sobre rendimientos crecientes en Economía (Arthur, 1994). Las economías de aglomeración, tan utilizadas en la Geografía Económica (Fujita & Thisse, 1996), pueden modelarse como un fenómeno de rendimientos crecientes. Pensemos, por ejemplo, que muchos de los beneficios que las empresas disfrutaban por estar ubicadas en un área geográfica, como unas mejores

infraestructuras o mayores polos de mano de obra especializada, crecen conforme más empresas se ubican en el mismo lugar (rendimientos crecientes).

Por otro lado, la dinámica acumulativa positiva descrita antes, que empuja la evolución de muchas industrias, suele estar condicionada por una secuencia de hechos u ocurrencias aleatorias, difícilmente predecibles. Por ejemplo, las primeras empresas de la industria electrónica que decidieron ubicarse en Silicon Valley (California) junto a la Universidad de Stanford podrían fácilmente haberse decantado por otra ubicación, y sin embargo su decisión condicionó significativamente la decisión de otras empresas (dependencia histórica) favoreciendo el desarrollo de de Silicon Valley hasta llegar a ser el cluster industrial que hoy conocemos⁶⁹.

La metáfora de la urna de Polya

Arthur aprovecha un problema planteado por Polya (Polya & Eggenberger, 1923), conocido como *urna de Polya*⁷⁰, para construir un marco formal con el que estudiar los fenómenos de rendimientos crecientes y dependencia histórica. Consideramos una mesa en la que en cada momento añadimos una bola de color, donde la probabilidad de un color en particular es una *función* de la proporción de bolas del mismo color presentes ya en el tablero. Arthur demuestra que conforme este proceso continua indefinidamente en el tiempo, la proporción de cada color tiende a un punto fijo de la función de probabilidad, donde la probabilidad de añadir un color es igual a la proporción de dicho color en la tabla (Arthur, 1994, 185-201). Una adecuada elección de esta función de probabilidad permite reproducir fenómenos de rendimientos

⁶⁹ Brian Arthur ve el cluster de Silicon Valley como el resultado de un proceso estocástico formado por una secuencia de hechos aleatorios que llama *accidentes históricos*, a diferencia de una aproximaciones teóricas puramente geográfica que vería a este cluster como el resultado esperado de las ventajas geográficas de esta área de California, aunque en sus orígenes apenas podía diferenciarse de otras áreas de US. La cuestión fundamental que subyace detrás de esta aproximación está directamente relacionada con el concepto de *dependencia histórica*, si hubiera habido otra secuencia de accidentes históricos, probablemente el resultado hubiera sido distinto.

⁷⁰ Imaginemos una urna infinitamente grande compuesta inicialmente por dos bolas, una blanca y otra negra. En cada momento extraemos una bola al azar y la reponemos junto con otra unidad del mismo color. En un instante dado la probabilidad de añadir una bola de uno de los dos colores es igual a la proporción de bolas del mismo color en la urna. Este modelo representa un proceso de dependencia histórica. Bajo estas hipótesis se demuestra que la proporción de bolas de cada color tiende a una proporción fija con probabilidad uno, y que dicha proporción sigue una distribución uniforme $U[0,1]$.

crecientes, decrecientes o mixtos, que dan origen a procesos con uno o varios puntos de equilibrio⁷¹.

Un modelo de aglomeración industrial

Arthur (1994, 49-67) propone un sencillo modelo de industria semejante a una urna de Polya: supongamos una industria infinitamente grande donde en cada momento una empresa decide ubicarse en una de las N posibles localizaciones. En la toma de decisión, una empresa i tiene en cuenta unos beneficios esperados para cada localización j -ésima r_j^i :

$$r_j^i = q_j^i + g(y_j) \quad (2.30)$$

donde q_j^i representa el beneficio geográfico que obtiene la empresa i -ésima al ubicarse en la localización j -ésima (cuantifica la preferencia original de la empresa por una ubicación), mientras que $g(y_j)$ recoge el beneficio proveniente por las economías de aglomeración cuando en la localización j -ésima existen y_j empresas instaladas⁷². Cada nueva empresa puede interpretarse como una realización del vector $q = (q_1, \dots, q_N)$ que representa las preferencias naturales de la empresa por cada localización.

Se define además el vector de probabilidades de localización $p = (p_1, \dots, p_N)$, donde p_j representa la probabilidad de que la localización j -ésima sea escogida por la empresa entrante, conocido el número de empresas instaladas en ese momento $y = (y_1, \dots, y_N)$:

$$p_j = \Pr ob \{r_j > r_k \text{ } k \neq j\} \quad (2.31)$$

⁷¹ El interés en este tipo de procesos se centra en el estudio de las propiedades de *predictabilidad* (capacidad que tienen un observador de predecir a priori el resultado final del proceso) y *ergodicidad* (verificar si el proceso es no dependiente históricamente, por lo que independientemente de la secuencia de sucesos aleatorios llegamos siempre a un mismo resultado).

⁷² Una adecuada elección de esta función g permite modelar fenómenos de *economías de escala* (valores siempre positivos), *deseconomías de escala* (valores siempre negativos) o mixtos (positivos o negativos en función del número de empresas y_j).

Suponiendo que no existen economías de aglomeración $g(y_j)=0$, las empresas toman sus decisiones teniendo en cuenta únicamente sus preferencias naturales que se mantienen constantes a lo largo del tiempo. Bajo estas hipótesis, la distribución espacial de la industria $x_j = y_j/n$ para un número de empresas n suficientemente grande converge a las proporciones p_j . La conclusión es evidente: cuando no existen economías de aglomeración la industria tenderá a una distribución espacial más o menos dispersa en función de la mayor o menor diversidad de preferencias de las empresas.

Sin embargo, cuando existen economías de aglomeración las preferencias p no son constantes sino que dependen de la secuencia histórica de empresas que se decantaron por cada una de las localizaciones. Con estas hipótesis, suponiendo economías monótonas crecientes, se demuestra que para un número de empresas suficientemente grande una de las localizaciones finalmente absorberá toda la industria (toda nueva empresa entrante escogerá con probabilidad 1 dicha localización). Este efecto *lock-in* por el que surge un cluster que monopoliza toda la industria cuando están presentes economías de aglomeración permitiría explicar, a juicio de Arthur, fenómenos de aglomeración industrial como Silicon Valley.

Arthur explora otros posibles escenarios modificando la función g que determina las economías de aglomeración. El aspecto más relevante de todo su análisis es la constatación de que cuando en una industria operan rendimientos crecientes un estudio estático centrado en los estados de equilibrio no es suficiente ni adecuado por cuanto la evolución de la industria es dependiente históricamente. La evolución de la distribución espacial de la industria puede interpretarse como un proceso evolutivo, tal y como introdujimos al comienzo de este capítulo, en el que cada localización compite por la entrada de nuevas empresas en un proceso donde la selección depende de la naturaleza de las economías de aglomeración.

Arthur aplica brillantemente conceptos evolucionistas como la dependencia histórica y los rendimientos crecientes para explicar los fenómenos de aglomeración industrial. Sin embargo sus trabajos no profundizan en la naturaleza de estos rendimientos crecientes. Su modelo simplifica notablemente la dinámica de la industria,

a diferencia de los modelos evolutivos de dinámica industrial que hemos descrito antes que describen la dimensión microeconómica de la industria.

2.5 Discusión

En este capítulo hemos hecho un repaso a los principios en los que se fundamenta la aproximación evolucionista a los fenómenos económicos. Los tres elementos que tejen el manto formal de la Economía Evolucionista (diversidad, selección y desarrollo) ofrecen un paradigma teórico que permite comprender mejor la complejidad de fenómenos económicos, donde la diversidad de agentes y comportamientos superan el aparato matemático de la economía clásica.

El núcleo teórico de la *Nueva Geografía Económica* está en clara contradicción con los principios evolucionistas. En nuestra opinión, los fenómenos económico-espaciales no pueden ser reducidos a modelos estáticos de equilibrio como formula la Nueva Geografía Económica, sino que han de ser entendidos como procesos dinámicos y complejos. La Economía Evolucionista permite ir más allá de la aproximación de la Nueva Geografía Económica, centrada en el tamaño del mercado, los costes de transporte y la movilidad de la mano de obra, para incorporar otros argumentos igualmente importantes como los procesos de innovación, los knowledge spillovers, los rendimientos crecientes y la dependencia histórica.

Desde una perspectiva evolucionista, la complejidad de los sistemas económico-geográficos emerge de la diversidad de comportamientos de los agentes económicos, donde la innovación juega un papel fundamental como motor de cambio y creadora de nueva diversidad. El espacio geográfico deja de ser un elemento pasivo –que aglutina todos los agentes económicos y recoge la diversidad económica, social, política, tecnológica o cultural–, para participar activamente en los procesos de selección y desarrollo de una industria.

En nuestra opinión, la incorporación de la dimensión espacial en los modelos evolutivos representa un paso natural en el desarrollo de esta disciplina. La integración de la Economía Evolucionista y la Geografía Económica tradicional abre la puerta a una nueva corriente de investigación que algunos autores han bautizado como Geografía Económica Evolucionista y en la que claramente podemos situar el trabajo de esta tesis.

La complejidad inherente a cualquier fenómeno de aglomeración económico-espacial requiere de nuevas metodologías y herramientas: nosotros pensamos que el modelado basado en agentes (*ABM: Agent-Based Modeling*) que vamos a abordar en el próximo capítulo, nos permite estudiar este tipo de fenómenos complejos mediante un modelado más fiel a la realidad, que recoge con más detalle las características de los agentes y su entorno geográfico, económico, social y cultural.

“Agent-based modeling is clearly a powerful tool in the analysis of spatially distributed systems of heterogeneous autonomous actors with bounded information and computing capacity.”

Joshua Epstein

Capítulo 3

Modelado basado en Agentes y Geografía Económica Evolucionista

La Geografía Económica estudia fenómenos económico-espaciales muy complejos que, en nuestra opinión, pueden integrarse dentro de una definición más general que denominamos *Sistemas Adaptativos Complejos (SAC)*. El estudio de estos sistemas puede desarrollarse siguiendo una aproximación *bottom-up*, que se orienta siempre a los elementos constituyentes del sistema que denominamos *agentes* para comprender cómo emergen las propiedades del sistema.

La complejidad de los SAC requiere de nuevas técnicas y herramientas de investigación que superen las limitaciones de la tradicional aproximación analítica. De entre estas técnicas sobresale el *Modelado Basado en Agentes (ABM)*, que se caracterizan por su naturaleza descriptiva y constructivista: se hace una traducción fiel de la realidad constituyente del fenómeno observado en un modelo computacional, cuya evolución depende del comportamiento individual de los agentes y sus correspondientes interacciones.

Vamos a estudiar con más detalle todos estos conceptos que constituyen la base metodológica sobre la que hemos desarrollado nuestra investigación. El capítulo está organizado en tres apartados. En el primero introducimos los SAC, que agrupan a los fenómenos de aglomeración y dinámica industrial objeto de esta tesis. Describimos algunas importantes propiedades como son el concepto de emergencia y el de ciencia generativa.

En el segundo apartado hablamos de los sistemas multiagente, y más concretamente del modelado basado en agentes. La potencia del ABM no solo radica en que el proceso de modelado es tanto más fiel a la realidad, por cuanto recoge con más detalle las características de las partes que lo integran, sino que además permite desarrollar herramientas a modo de laboratorios experimentales tan deseables desde disciplinas científicas como las ciencias sociales, que hasta el momento han carecido de ellas.

Por último, introducimos una nueva línea de investigación económica llamada *Economía Computacional basada en Agentes (ACE)*, que integra el paradigma evolucionista junto con la visión de los SAC y ABM. Vamos a argumentar que ACE es la expresión de un nuevo paradigma de investigación que se adapta muy bien a la fenomenología de la Geografía Económica, aunque todavía es una disciplina por evolucionar metodológicamente y teóricamente.

3.1 Sistemas Adaptativos Complejos (SAC)

3.1.1 Definición y características de los SAC

Después de lo expuesto en los capítulos anteriores se comprende que la Geografía Económica estudia fenómenos económico-espaciales muy complejos. Por citar algunas características de estos fenómenos: los agentes económicos no se comportan de forma racional; la estructura social juega un papel muy importante en las relaciones de competitividad y cooperación entre los individuos y organizaciones; se hacen presentes fuerzas centrífugas y centrípetas que favorecen la expansión o la contracción de las empresas; existe una gran dependencia de la evolución histórica; y en general, podemos descubrir una diversidad de aspectos culturales, sociales y económicos que condicionan su desarrollo.

Existen en la naturaleza fenómenos igualmente complejos, que han despertado el interés de muchas disciplinas científicas. No es de extrañar, por tanto, que haya coincidencias en cuanto a la metodología y herramientas empleadas para su investigación en todas ellas. Un intento por integrar posturas y construir un marco riguroso desde el que poder estudiar la complejidad de muchos sistemas lo encontramos

en el concepto de *sistemas adaptativos complejos (SAC)*. Un SAC se caracteriza por (Holland, 2002):

- Un conjunto de elementos constituyentes que denominamos *agentes*.
- Los agentes *interactúan* entre ellos y con el entorno que les rodea, y estas interacciones se pueden describir mediante reglas del tipo condición/acción⁷³.
- Los agentes pueden *aprender* y modificar las reglas teniendo en cuenta su experiencia y diferentes estrategias de búsqueda e innovación.

Este tipo de sistemas exhibe comúnmente algunas propiedades importantes:

- La *descentralización*: no existen entidades centrales que planifiquen ni dirijan el comportamiento del sistema, sino que éste es resultado de los comportamientos individuales de los agentes. Pensemos por ejemplo en la dinámica de los mercados financieros donde generalmente agentes económicos muy heterogéneos actúan con autonomía siguiendo sus propios objetivos (Pajares *et al.*, 2005b).
- La *auto-organización*: la capacidad que tienen los agentes de organizarse por sí mismos y construir grupos o asociaciones más complejas. Es el caso de las redes sociales a las que cada vez se da más importancia en el estudio de muchos sistemas complejos (Newman, 2003).
- La *realimentación positiva*: los efectos de los comportamientos de los agentes en ocasiones pueden reforzar positivamente los comportamientos iniciales. La realimentación es una propiedad muy semejante al concepto de rendimientos crecientes, ya comentado en esta tesis, y que encontramos en muchos fenómenos económicos (Arthur, 1989).

Si trasladamos todo esto a los sistemas evolutivos descritos en el capítulo anterior, fácilmente podemos deducir que cualquier sistema evolucionista puede considerarse como un sistema complejo adaptativo: la diversidad de un sistema evolutivo está formada por un conjunto variado de agentes que exhiben diferentes comportamientos, los procesos de selección se manifiestan a través de las interacciones

⁷³ Estas reglas pueden describirse mediante sencillas estructuras condicionales del tipo *SI {condiciones} ENTONCES {acciones}* que pueden implementarse en cualquier lenguaje de programación de propósito general.

entre los agentes, y los procesos de desarrollo requieren que los agentes tengan capacidad de adaptarse y aprender nuevos comportamientos. Si bien la aproximación evolucionista suele acentuar la dinámica de población (desaparición y creación de nuevos agentes) que en la descripción anterior de los SAC no se menciona directamente.

Siendo fieles a su naturaleza, los SAC suelen ser demasiado complejos como para que puedan ser descritos mediante formulaciones analíticas⁷⁴. Se requiere de otro tipo de representación, y consecuentemente otro tipo de herramientas de estudio, que englobamos dentro del concepto de *Modelado Basado en Agentes (ABM: Agent-Based Modeling)*, y que introduciremos en la siguiente sección. Vamos a ver que los modelos computacionales basados en agentes no solo son muy adecuados para estudiar sistemas complejos, sino que constituyen la manera más natural de hacerlo (Axtell, 2000), pues existe una traducción directa de los diferentes elementos que componen un SAC a las entidades computacionales que conforman un modelo basado en agentes representativo.

3.1.2 Fenómenos emergentes y ciencia generativa

Emergencia

A la hora de estudiar y describir la dinámica de los SAC se suele prestar especial atención al fenómeno de *emergencia*. Epstein y Axtell (1996, 35) definen emergencia a cualquier propiedad del sistema que surge como resultado de la interacción entre los agentes. Nosotros matizamos esta definición añadiendo que generalmente el propósito de una investigación no es el de explicar todo fenómeno emergente de un SAC, sino más concretamente aquellas propiedades del sistema que se repiten bajo unas determinadas condiciones, y que por su naturaleza repetitiva son representativas del mismo.

En el capítulo anterior señalábamos que un programa evolucionista debía orientarse a explicar los mecanismos que gobiernan el proceso evolutivo. Podemos inscribir el concepto de emergencia dentro de este objetivo, diciendo que el interés de

⁷⁴ Por formulaciones analíticas nos referimos a modelos formales expresados mediante ecuaciones matemáticas, lo que no supone obligatoriamente que dichas ecuaciones puedan resolverse analíticamente, pudiendo ser necesario recurrir a técnicas de cálculo computacional para su estudio.

un economista evolucionista se centra en estudiar aquellos mecanismos que permiten caracterizar los fenómenos emergentes de un SAC evolutivo.

Holland (2002) introduce algunos criterios necesarios para considerar un fenómeno como emergente, y consecuentemente de interés de estudio:

- Deber ser *regular*: aparece de forma repetitiva a pesar de la dinámica evolutiva y no determinista del sistema.
- Depende simultáneamente de efectos *bottom-up* y *top-down* del sistema. Por ejemplo, dejando a un lado la aproximación clásica de mercado perfecto, una variable como el precio de un producto depende del comportamiento individual de los agentes (efecto bottom-up), y a su vez influye en el comportamiento de los agentes (efecto top-down).
- No puede ser reducido a la suma de los comportamientos individuales de los agentes, toda vez que estos comportamientos no son aditivos sino que suelen responder a dinámicas no lineales.

Ciencia generativa

Algunos autores (Axelrod, 1997a; Epstein, 1999) han dado un paso más en la investigación de SAC acuñando un nuevo concepto: la *ciencia generativa*. De lo visto hasta ahora, sabemos que los SAC están constituidos por un conjunto de agentes heterogéneos que interactúan descentralizadamente, y también, que el interés del investigador se centra en el estudio de aquellas propiedades repetitivas del sistema que llamamos fenómenos emergentes. La unión de estos dos elementos nos permite definir el concepto de ciencia generativa: el intento de explicar (generar) los fenómenos emergentes característicos de un sistema complejo a partir de los comportamientos individuales y de las interacciones de los agentes que constituyen el sistema.

El principal problema de muchos sistemas complejos es que, aunque resulta sencillo medir determinadas propiedades del sistema, se desconocen los comportamientos individuales de los agentes que son responsables de generarlos –sobre los cuales un investigador puede manejar diversas hipótesis plausibles–. Siguiendo una aproximación generativa, además nos encontramos con que habitualmente es difícil y costoso comprobar la validez de determinadas hipótesis en los sistemas reales.

Pensemos, por ejemplo, en los mercados financieros y en cómo los comportamientos individuales de los diferentes agentes económicos pueden afectar a la volatilidad del mercado; evidentemente resulta difícil experimentar en este tipo de mercados reales.

Los modelos computacionales basados en agentes constituyen el principal instrumento de la ciencia generativa, ya que permiten construir laboratorios virtuales donde poder desarrollar una investigación sobre fenómenos emergentes de sistemas complejos –como el comentado sobre la volatilidad de los mercados financieros (Pajares *et al*, 2005b)–.

3.2 Modelado Basado en Agentes (ABM)

3.2.1 Introducción a los Sistemas Multiagente (MAS)

Los Sistemas Multiagente (*MAS: Multi-Agent Systems*) pueden considerarse como una rama de la Ciencia Computacional, y representan hoy en día un nuevo paradigma en el desarrollo de software con múltiples aplicaciones en una gran diversidad de áreas científicas y económicas⁷⁵.

La piedra angular de los sistemas multiagente reside en el concepto de *agente*: una entidad hardware o software que se comporta de forma autónoma dentro de un entorno con el propósito de conseguir los objetivos para los que fue diseñado (Wooldridge, 1999). En la medida en que dispongamos de un conjunto de agentes interactuando en un entorno (físico, electrónico, etc.) hablamos de un sistema multiagente.

Las características de un agente pueden resumirse en (Wooldridge & Jennings, 1995)⁷⁶:

⁷⁵ El objetivo de este apartado es ofrecer una breve introducción a los *sistemas multiagente* en donde, en nuestra opinión, se inscribe la técnica de *modelado basado en agentes (ABM)*. Los sistemas multiagente comprenden una heterogénea investigación que está fuera del alcance de esta tesis. Dentro de la diversidad de aplicaciones de los sistemas multiagente, ABM posee una finalidad muy diferenciada que es la simulación de sistemas complejos –en nuestro caso nos interesa la aplicación de ABM al modelado y simulación de sistemas económico-geográficos–. Una lectura más profunda sobre los sistemas multiagente se puede encontrar en (Wooldridge, 1999), así como una interesante repaso a sus aplicaciones en (Luck *et al*, 2004; Pavón & Pérez, 2004).

⁷⁶ Wooldridge y Jennings formulan estas propiedades desde la perspectiva de quien pretende diseñar un agente (hardware-software) para desarrollar algún tipo de tarea en un determinado entorno. Sin embargo

- *Autonomía*: tienen algún tipo de control sobre sus acciones y estados internos.
- *Habilidad social*: interactúan con otros agentes.
- *Reactividad*: responden a los estímulos del entorno.
- *Proactividad*: muestran intencionalidad dirigiendo sus acciones a la consecución de sus objetivos.

El éxito incuestionable de los sistemas multiagente se debe principalmente a su capacidad para abordar problemas complejos de naturaleza distribuida –problemas que requieren de soluciones flexibles y adaptativas, capaces de operar de forma autónoma–.

La aplicación de la tecnología multiagente se extiende a un ritmo exponencial abarcando áreas y dominios de aplicación muy heterogéneos: aplicaciones en la industria (Giret *et al.*, 2005), medicina (Moreno, 2005), gestión de la información (Julián *et al.*, 2005), telecomunicaciones (Albayrak & Garijo, 1998), comercio electrónico (Doorenbos *et al.*, 1997), videojuegos (Wavish & Graham, 1996), y herramientas de modelado y simulación (Gilbert & Troitzsch, 1999; Moss & Davidsson, 2001; Aguilera & López-Paredes, 2001) donde se inscribe el modelado basado en agentes.

3.2.2 Modelado basado en agentes y sociedades artificiales

Modelado y simulación computacional basada en agentes

La herramienta fundamental de estudio de SAC es el *modelo*: abstracción particular de un sistema orientada a comprender sus propiedades y cómo funciona⁷⁷. El *modelado basado en agentes (ABM)* constituye una técnica de modelado en la que se establece una correspondencia directa entre los elementos que constituyen el sistema observado y las entidades (*agentes*) del modelo representativo (ver Figura 14).

nosotros proponemos observarlas desde la perspectiva del modelado de sistemas complejos adaptativos que venimos introduciendo en este capítulo: en la medida en que las entidades que conforman un sistema exhiben alguna o todas estas propiedades resultaría adecuado la utilización de los sistemas multiagente –más concretamente del modelado basado en agentes–.

⁷⁷ La cuestión que se plantea el investigador es cómo expresar formalmente este modelo, sabiendo las características propias de los SAC (apartado 3.1.1). La representación matemática suele ser la más utilizada. Sin embargo se puede utilizar otro tipo de lenguajes formales como son la representación algorítmica de los modelos computacionales basados en agentes sin que ello suponga una pérdida de rigor en la investigación científica.

La gran diferencia frente a otras técnicas de modelado es su naturaleza descriptiva y constructivista: en la medida de lo posible el investigador⁷⁸ trata de hacer una traducción fiel de la realidad constituyente del fenómeno observado en un modelo computacional, cuya evolución depende del comportamiento individual de los agentes y las correspondientes interacciones.

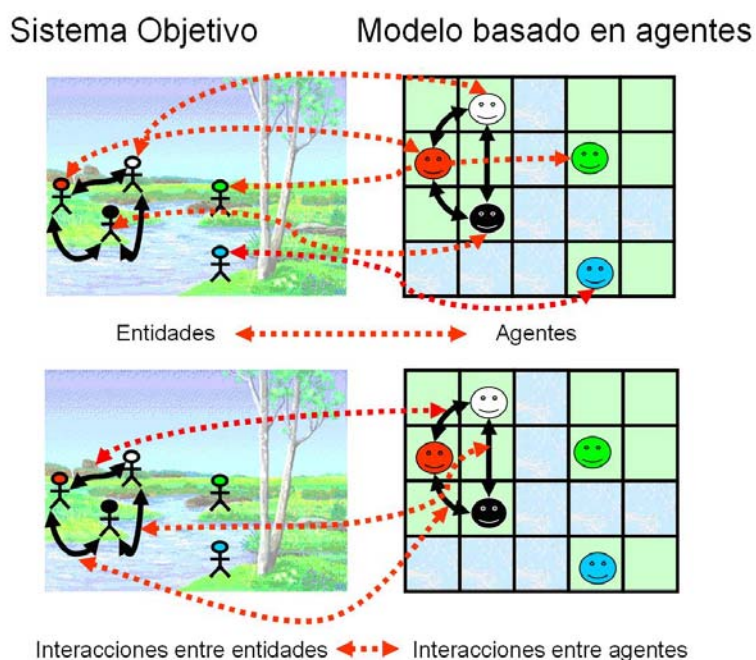


Figura 17. Sistema real y modelo basado en agentes representativo.

En el modelado basado en agentes se establece una relación directa entre las entidades que forman el sistema observado y sus relaciones, y los agentes e interacciones en el modelo computacional representativo (Galán *et al.*, 2007a).

El estudio de un modelo basado en agentes se lleva a cabo generalmente mediante simulación computacional, de ahí que se utilice también el término de *simulación computacional basada en agentes*. Un ámbito natural de aplicación de esta técnica es el modelado y simulación en las Ciencias Sociales, dentro de las cuales a veces se suele denominar a estos modelos como *sociedades artificiales de agentes*.

⁷⁸ Sin que afecte a los resultados de esta tesis, nosotros utilizamos la figura del *investigador* como único responsable de todo el proceso de diseño e implementación de un modelo basado en agentes. Sin embargo, en ocasiones se suele distinguir diferentes roles en este proceso (Galán *et al.*, 2007a) con la intención de profundizar en aspectos metodológicos. Los roles que intervienen en ABM pueden clasificarse como: *thematician* – experto en el dominio, *modeler* – que formaliza el conocimiento del experto, *computer scientist* – que define el modelo computacional que mejor se ajusta al modelo formal, *programmer* – que implementa el modelo ejecutable en algún lenguaje de programación.

Sin embargo, conviene no confundir semánticamente estos dos términos ampliamente utilizados en ABM: modelado y simulación⁷⁹. Por simulación entendemos: “conducir un modelo de un sistema con unas determinadas entradas y observar las correspondientes salidas” (Bratley *et al*, 1987), y no tiene porqué ser siempre llevada a cabo en un ordenador. La simulación puede ser utilizada para diferentes fines, desde el pronóstico, la educación, la demostración de hipótesis o el desarrollo de teorías, aunque estemos utilizando un mismo modelo (Gilbert & Troitzsch, 1999).

Características de los modelos basados en agentes

Desde nuestro punto de vista, ABM constituye la herramienta de modelado natural para el estudio de SAC, en la medida en que un modelo basado en agentes exhibe importantes propiedades (Epstein, 1999)⁸⁰:

- *Heterogeneidad*: en un modelo se respetan las características propias de cada agente, evitando en la medida de lo posible esconder la individualidad dentro de formalizaciones agregadas de comportamiento, tan frecuentes por ejemplo en las explicaciones microeconómicas clásicas.
- *Autonomía*: los agentes actúan de forma autónoma y descentralizadamente, aunque sin olvidar los condicionamientos del entorno que pueden aparecer en forma de normas, instituciones sociales o económicas, etc.
- Un *espacio explícito*: un modelo basado en agentes permite capturar el entorno donde se desenvuelven los agentes, no sólo puramente geográfico sino también social y cultural.
- *Interacciones locales*: se modelan todos los posibles contactos e intercambios entre los agentes y el entorno que a priori pueden condicionar significativamente el comportamiento del sistema.

⁷⁹ Aunque en la práctica esta distinción queda bastante diluida en la medida en que la mayoría de los modelos basados en agentes requieren, y están diseñados explícitamente, de la simulación computacional para su estudio y análisis. Es frecuente que en estos casos se hable de forma indistinta de modelado o simulación computacional basada en agentes, como por ejemplo en la conocida guía sobre simulación en las Ciencias Sociales de Axelrod (Axelrod, 1997a).

⁸⁰ La mayoría de estas características chocan fuertemente con las principales hipótesis sobre las que se formaliza la economía clásica, en cambio se adaptan adecuadamente a los principios evolucionistas de diversidad, selección y desarrollo. Además se incorpora de forma natural la dimensión espacial tan importante para la Geografía Económica.

- *Racionalidad limitada*: los agentes disponen de una información imperfecta acerca del sistema y del conjunto de agentes, y además, están dotados de unas capacidades limitadas no siempre igualmente repartidas.

Un enfoque analítico de ABM

A pesar de la naturaleza algorítmica de la mayoría de los modelos basados en agentes –representamos el modelo mediante algoritmos que se implementan en algún lenguaje de programación–, estos pueden describirse formalmente mediante un sistema de ecuaciones matemáticas⁸¹ (Leombruni & Richiardi, 2005).

En cada instante t un agente i , $i \in 1, \dots, n$, puede ser descrito por una variable de estado $x_{i,t} \in \mathbb{R}^k$. Supongamos que los agentes cambian de estado de forma determinista⁸² de acuerdo con la siguiente ecuación en diferencias:

$$x_{i,t+1} = f_i(x_{i,t}, x_{-i,t}; \alpha_i) \quad (3.1)$$

Donde $f_i(\cdot)$ describe el cambio de estados del agente, que puede depender de unos parámetros propios del individuo α_i , del estado previo del agente $x_{i,t}$ y del estado previo del resto de los agentes $x_{-i,t}$. Una propiedad agregada del sistema puede ser calculada mediante el correspondiente estadístico Y_t definido sobre la población de agentes:

$$Y_t = s(x_{1,t}, \dots, x_{n,t}) \quad (3.2)$$

Se puede demostrar fácilmente que la Ec. (3.2) puede ser resuelta para cada t independientemente de la especificación adoptada para $f_i(\cdot)$ de forma iterativa:

⁸¹ El objetivo de este apartado es hacer notar que cualquier modelo basado en agentes tiene una expresión analítica equivalente. De hecho, todo modelo basado en agentes puede ser implementado en una máquina de Turing, que a su vez tiene una función recursiva equivalente y única (Epstein, 1999). El problema es que este sistema de ecuaciones recursivas no puede tratarse analíticamente, ni por sí mismo aporta un conocimiento útil sobre el modelo ni el fenómeno que pretende representar.

⁸² Una función estocástica no modifica sustancialmente la representación analítica presentada.

$$\begin{aligned}
Y_0 &= s(x_{1,0}, \dots, x_{n,0}) \\
Y_1 &= s(x_{1,1}, \dots, x_{n,1}) \\
&= s(f_1(x_{1,0}, x_{-1,0}; \alpha_1), \dots, f_n(x_{n,0}, x_{-n,0}; \alpha_n)) \\
&\equiv g_1(x_{1,0}, \dots, x_{n,0}; \alpha_1, \dots, \alpha_n) \\
&\vdots \\
Y_t &= g_t(x_{1,0}, \dots, x_{n,0}; \alpha_1, \dots, \alpha_n)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Vemos que la variable Y se relaciona en cualquier instante de tiempo t con las condiciones iniciales del sistema y con los valores de los parámetros α_i . Si la función g_t converge a una función no dependiente de t nos encontramos con un valor de equilibrio:

$$Y^e = \lim_{t \rightarrow \infty} Y_t \equiv g(x_{1,0}, \dots, x_{n,0}; \alpha_1, \dots, \alpha_n) \tag{3.4}$$

Si bien, las diferentes funciones $f_i(\cdot)$ que describen el comportamiento de los agentes (cambio de estado) pueden ser relativamente sencillas, no ocurre lo mismo con las funciones que gobiernan cualquier variable agregada del sistema Y analíticamente.

Podemos concluir diciendo que la simulación computacional de un modelo basado en agentes consiste, desde un punto de vista puramente analítico, en un estudio experimental del comportamiento local de una función Y (que representa la propiedad del sistema que queremos estudiar) alrededor de unos valores de estado iniciales del conjunto de agentes (que se corresponderán con alguna de las hipótesis de investigación).

3.2.3 Metodología del ABM

Todo modelo basado en agentes comienza con la identificación y posterior implementación mediante software de las entidades individuales o agentes que participan, así como de sus relaciones e interacciones, para finalmente estudiar los fenómenos que emergen mediante simulación computacional. La metodología del ABM puede resumirse de la siguiente forma (ver Figura 18):

4. Comenzamos con la observación de un determinado fenómeno, la abstracción de los elementos más importantes y la formulación de las principales hipótesis de investigación.

5. Seguimos con el proceso de diseño, propiamente modelado, en el que se formaliza un modelo basado en agentes y se implementa su correspondiente expresión computacional.
6. Luego, se lleva a cabo el diseño de experimentos para obtener los resultados de simulación necesarios para hacer la correspondiente inferencia.
7. Tratamos y analizamos los resultados mediante técnicas estadísticas adecuadas.
8. Interpretamos y obtenemos las conclusiones más importantes, que suelen confirmar o rebatir las hipótesis iniciales.
9. Por último tratamos de aplicar el conocimiento obtenido al sistema objetivo que hemos estudiado mediante simulación computacional basada en agentes.

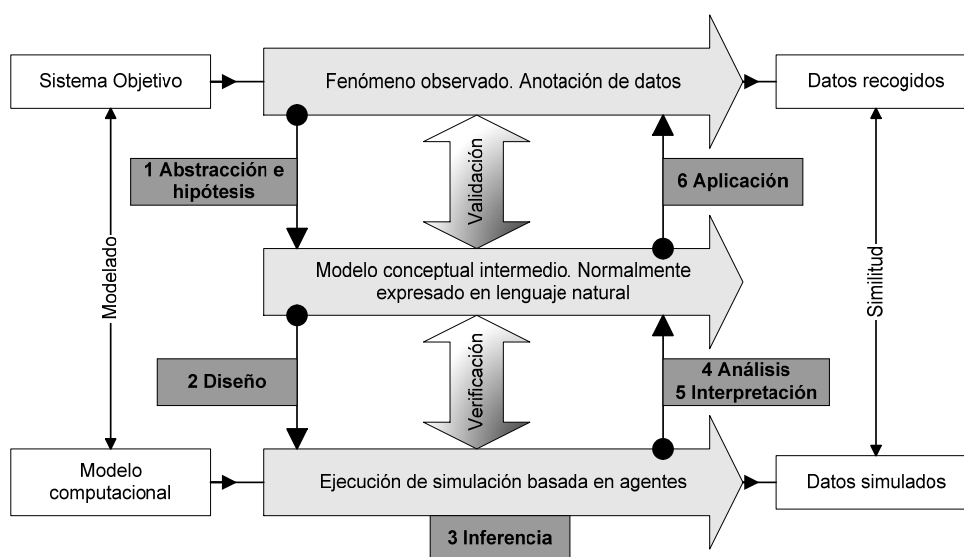


Figura 18. Metodología del desarrollo de un modelo basado en agentes.

Elaboración por (Galán, 2007) a partir de (Gilbert & Troitzsch, 1999; Edmonds, 2001).

Cuando utilizamos la formulación matemática para describir un modelo –un ejemplo claro es la familia de modelos de competencia monopolística utilizados por la Nueva Geografía Económica–, es posible llegar a deducir analíticamente el comportamiento global del sistema. Sin embargo, en ABM, que utiliza una descripción algorítmica del modelo, resulta imprescindible la simulación computacional para poder inferir las propiedades emergentes del sistema. Es por esta razón, que las etapas posteriores al diseño de un modelo basado en agentes resultan especialmente

importantes (Axelrod, 1997a). Nos referimos a la implementación del modelo, su análisis y la difusión de resultados.

Implementación de un modelo

Aunque pueda parecer importante la elección de un determinado lenguaje de programación, desde un punto de vista teórico cualquier lenguaje de propósito general es suficiente para implementar un modelo basado en agentes⁸³. Aun así, conviene pensar a priori las ventajas e inconvenientes del lenguaje que finalmente empleemos. Por ejemplo, podemos tener en cuenta las propiedades que Axelrod exige a un programa para desarrollar modelos de simulación (Axelrod, 1997a): *validez, usabilidad y extendibilidad*.

La validez expresa la exigencia de que el lenguaje implemente correctamente cualquier modelo formal, una condición del todo imprescindible. La usabilidad mide la capacidad para ejecutar un programa, interpretar sus resultados y comprender cómo funciona. Por último, la extendibilidad hace referencia a la facilidad para extender y desarrollar nuevos modelos a partir de un modelo previamente implementado.

Analizar y difundir los resultados

Una de las etapas clave del modelado y simulación basada en agentes es el *diseño de experimentos*. No podemos olvidar que desde un punto de vista estadístico el resultado de una simulación representa únicamente una muestra, sobre la cual difícilmente podemos hacer más inferencia. Sin embargo aquí también radica una de las ventajas de la simulación computacional, y es la posibilidad de llevar a cabo tantas simulaciones como queramos. Las características del modelo (evolutivo/estático, ergódico/path dependence, etc.) condicionarán el tipo y las técnicas estadísticas necesarias para su estudio.

Aunque pudiera parecer poco importante, tenemos además la cuestión de cómo compartir los resultados de nuestra investigación con el resto de la comunidad

⁸³ Independientemente de que utilicemos una aproximación imperativa o declarativa. Es por esta razón por la que dejamos a un lado la cuestión sobre las plataformas de desarrollo de ABM, cuya discusión es indiferente del modelo propuesto en esta tesis y su posterior análisis. Para una lectura sobre diferentes aplicaciones de desarrollo ABM ver (Galán *et al.*, 2003b; Tobias & Hofmann, 2004).

científica. Aquí nos encontramos con algunos obstáculos provenientes de la propia naturaleza del modelado y simulación computacional (Axelrod, 1997a):

- En primer lugar, la dificultad de transmitir correctamente y completamente el modelo formal. Algo muy importante si tenemos en cuenta la sensibilidad de los resultados a pequeñas variaciones en los parámetros o la estructura de cualquier modelo.
- En segundo lugar, la dificultad de transmitir los datos de la simulación y el análisis estadístico correspondiente, tanto más difícil cuanto más complejo sea el diseño de experimentos planteado. En esta cuestión y en la anterior se hace necesario recurrir a otras vías de comunicación, además de la publicación tradicional en revistas, que pasan generalmente por la puesta a disposición del código del modelo, así como de las condiciones de los experimentos y sus resultados.
- La última dificultad proviene de la audiencia de nuestro trabajo. La propia metodología ABM hace posible la incorporación de aportaciones provenientes de diferentes disciplinas. Sin embargo, esto dificulta la comunicación de resultados a grupos tan heterogéneos, que en muchos casos además no comparten nuestro conocimiento sobre el modelado y simulación computacional.

3.2.4 Verificación, validación y replicación de modelos

Una dificultad importante del ABM reside en la propia naturaleza de la tarea de definir, implementar y simular modelos software de agentes, que en ocasiones puede adolecer de falta de rigurosidad científica. No es lo mismo discutir sobre un modelo expresado matemáticamente, que sobre otro que se fundamenta en una colección de líneas de código escritas en un determinado lenguaje de programación.

El desarrollo con éxito de un programa informático de agentes que reproducen un determinado fenómeno social no es en sí mismo una garantía de que la abstracción del fenómeno recogida en el modelo sea correcta. Habría que preguntarse por ejemplo, si la implementación en código responde exactamente al modelo conceptual del problema, si se ha comprobado la robustez del modelo mediante un adecuado análisis

de sensibilidad de los parámetros, o si los resultados que se obtienen son independientes de la plataforma donde se ha desarrollado e implementado el modelo.

Cuando desarrollamos un modelo basado en agentes, debemos en cualquier caso asegurarnos de dos cosas:

- Que la implementación realizada responde exactamente al modelo formal propuesto. Esto es lo que se conoce como *verificación*, y en ocasiones puede resultar más difícil de lo que parece (Polhill *et al.*, 2005).
- Que el modelo formal e implementado sea una adecuada representación del fenómeno o sistema de estudio. Esto se conoce como *validación*. A diferencia de otras ciencias, la validación de modelos en Ciencias Sociales suele ser una tarea muy compleja en la medida en que resulta difícil disponer de datos reales completos y suficientes.

En Ciencias Sociales se suele hablar de dos grandes tipos de validación de un modelo: *validación estructural* y *validación de los outputs* generados. La primera de las validaciones pretende revisar los fundamentos teóricos sobre los que se construye el modelo, principalmente el comportamiento de los agentes y sus interacciones, y si estos son razonables y coherentes desde el punto de vista del dominio del sistema que el modelo pretende representar⁸⁴.

La segunda validación responde a la visión tradicional de estudiar la capacidad que tiene el modelo de reproducir resultados reales. Frecuentemente, y ante la falta de datos reales suficientes para contrastar, se relaja este requerimiento comprobando únicamente la capacidad que tiene el modelo de reproducir aquellos comportamientos que se consideren representativos del sistema objetivo (*stylized facts*).

Son tantas las variables que intervienen en el proceso de diseño, implementación y simulación de un modelo basado en agentes que resulta necesario utilizar algún tipo de técnica o procedimiento para asegurarnos de que los resultados son correctos y las

⁸⁴ Un ejemplo sobre validación estructural en un modelo basado en agentes lo encontramos en el trabajo (Galán, 2007) donde se acude a técnicas de participación con expertos en el dominio que analizan y validan la correcta descripción del comportamiento de los agentes y la credibilidad de los resultados proporcionados por las simulaciones.

interpretaciones obtenidas adecuadas. Incluso más allá de la verificación y la validación comentadas, un modelo puede estar construido sobre hipótesis que el investigador considera a priori no importantes, y que sin embargo pueden finalmente condicionar significativamente los resultados introduciendo un *artefacto* no deseado (Galán *et al*, 2007a). Cuando esto ocurre se corre el riesgo de interpretar los resultados de las simulaciones más allá del ámbito del modelo de simulación (Edmonds & Hales, 2003).

Con este objetivo nace el concepto de *replicación*: reproducir los resultados de un modelo por un investigador independiente (normalmente empleando un lenguaje, plataforma y contexto computacional diferentes). Mediante la replicación de modelos podemos descubrir desde simples errores de programación, hasta errores en el análisis e interpretación de los datos de simulación (Axelrod, 1997a). Sin embargo la replicación suele ser una tarea no exenta de dificultad (Galán *et al.*, 2003a), principalmente por:

- La dificultad para obtener una descripción exacta y completa del modelo formal que queremos replicar. Son frecuentes las ambigüedades en las descripciones del comportamiento de los agentes, así como en la descripción de los experimentos y resultados.
- El peligro de los errores de punto flotante (Polhill *et al*, 2005).
- A veces la descripción de los modelos está ligada a una arquitectura específica, confundiéndose modelo e implementación. En estos casos el replicador se enfrenta al desafío de intuir el modelo conceptual que se sobrentiende en el modelo original.
- Por último, la baja rentabilidad académica de este tipo de trabajos, que puesto que no aportan novedad suelen no ser bien valorados.

3.2.5 ABM y sistemas complejos

En este capítulo hemos decidido diferenciar desde el principio el estudio de los sistemas adaptativos complejos del modelado basado en agentes. Esta decisión responde a una intención clara de separar el fenómeno y su complejidad, que suscita nuestro interés investigador, de la metodología y herramienta que empleamos para su estudio (ya sea ésta analítica, basada en la simulación o mezcla de ambas).

El modelado basado en agentes constituye un nuevo instrumento en la investigación científica, especialmente idóneo para el estudio de sistemas complejos adaptativos como es el caso de muchos de los sistemas sociales y económicos (Pajares *et al*, 2004). La principal diferencia del ABM frente a otras técnicas de modelado y simulación computacional⁸⁵ es su naturaleza *bottom-up*, una aproximación que construye el comportamiento del sistema a partir de las hipótesis sobre las partes que lo forman, evitando cualquier tipo de suposición sobre el comportamiento global del conjunto. Desde esta perspectiva, un modelo basado en agentes puede entenderse como: “*computational demonstration that a given microspecification is in fact sufficient to generate a macrostructure of interest*” (Epstein, 1999).

Ventajas del ABM

La potencia de esta metodología nos solo radica en que el proceso de modelado es tanto más fiel a la realidad, por cuanto recoge con más detalle las características de las partes que lo integran, sino que además permite disponer de herramientas a modo de laboratorios experimentales tan deseables desde disciplinas científicas como las ciencias sociales, que hasta el momento han carecido de ello.

La utilización de la simulación computacional basada en agentes no está reñida con el empleo de otras técnicas como las analíticas. En este sentido Axtel (Axtell, 2000) propone diferentes aplicaciones del ABM que complementan y mejoran el análisis matemático. Por ejemplo, en el caso de modelos matemáticos completos podemos utilizar la simulación basada en agentes como técnica de Monte Carlo para contrastar experimentalmente las conclusiones demostradas analíticamente, o también para representar de manera visual los resultados matemáticos. En otros casos, más frecuentes, en los que tenemos modelos matemáticos parcialmente solubles, ABM permite muchas cosas: explorar el ámbito de soluciones relajando las hipótesis, comprobar la robustez de las deducciones analíticas, o simplemente estudiar la dimensión evolutiva de un sistema más allá de sus posibles estados de equilibrio (Axtell, 1999).

⁸⁵ Véase por ejemplo la aproximación de la Dinámica de Sistemas al estudio de sistemas complejos (Forrester, 1994).

Aunque, a diferencia de las técnicas analíticas, ABM permite fácilmente el desarrollo de programas de investigación interdisciplinarios. En las Ciencias Sociales nos encontramos con fenómenos complejos que no pueden, ni deben, estudiarse desde un único prisma de conocimiento. Los individuos exhiben diferentes dimensiones: psicológica, social, económica, geográfica, por citar algunas, que resultan difíciles de separar. En la medida en que ABM construye sus modelos centrando la atención en el individuo y sus comportamientos, resulta más fácil incorporar teorías provenientes de diferentes disciplinas.

Sin embargo, la obtención de conocimiento a través de ABM no carece de dificultad. Conseguir una representación micro capaz de generar el comportamiento macro objeto de estudio, no garantiza que esta solución sea única, ni tampoco que sea la más adecuada (Epstein, 1999). Es probable que nos encontremos con diferentes microestructuras capaces de explicar los fenómenos a nivel macro. Si fuera el caso, se deberá estudiar cuál de ellas es más conciliable con el mundo real, tarea tanto más compleja y heurística en tanto los fenómenos que estamos modelando sean más complejos.

Simplicidad versus descripción

Todo modelo responde a unas hipótesis previas del investigador que orientan y dirigen todo el proceso de modelado y simulación. Este aspecto es muy importante, pues permite al investigador decidir qué elementos son fundamentales en su estudio, y consecuentemente han de estar presentes en el modelo, y cuáles son irrelevantes y pueden, deben, suprimirse del análisis.

En el caso del ABM esta cuestión se vuelve todavía más importante pues resulta muy sencillo, casi podríamos decir que muy tentador, incorporar más y más detalles en el desarrollo de un modelo. Sin embargo, es necesario llegar a una decisión de compromiso entre la capacidad descriptiva del modelo (detalle) y su simplicidad, teniendo en cuenta siempre el objetivo y alcance de la investigación⁸⁶.

⁸⁶ Existe un debate en torno a la estrategia a emplear con el ABM: de un lado aquellos que defienden desarrollar e implementar modelos lo más sencillos posibles, pues es la única forma de poder explicar completamente la inferencia extraída de un modelo multiagente, y que se concreta en el motto *Keep It Simple Stupid (KISS)* propuesto por Axelrod (the complexity of cooperation 1997); de otro aquellos que consideran fundamental tratar de ser lo más descriptivos posibles, si realmente se quiere captar la

En definitiva, el propósito de un modelo basado en agentes no es el de ser una fiel representación del fenómeno que estemos estudiando, sino el de ayudar al investigador a comprender y estudiar dicho fenómeno (Axelrod, 1997a). No debiéramos introducir una innecesaria complejidad en el modelo que nos haga todavía más difícil la interpretación de un fenómeno que generalmente es ya por sí mismo complejo.

3.3 Economía Computacional basada en Agentes (ACE)

3.3.1 Integración de los principios evolucionistas y ABM

La Economía estudia sistemas complejos compuestos por sociedades de individuos que interactúan y se relacionan de forma distribuida en un entorno económico, social y geográfico. Al afirmar esto no estamos más que definiendo al fenómeno económico como un sistema adaptativo complejo, tal y como presentamos estos sistemas al comienzo de este capítulo.

Cualquier programa de investigación económica debiera de tener en cuenta las propiedades que caracterizan estos sistemas, por ejemplo: racionalidad limitada de los agentes, información imperfecta, aprendizaje colectivo, interacción estratégica, múltiples equilibrios (Tesfatsion, 2006) –si no para ser incorporadas en el estudio al menos se ha de justificar su no inclusión–.

La aplicación del ABM a los fenómenos económicos ha dado origen a un programa de investigación denominado *Economía Computacional Basada en Agentes (ACE: Agent-based Computational Economics)*: estudio computacional de la Economía modelada como un sistema evolutivo de agentes autónomos que interactúan (Tesfatsion, 2003). El investigador, una vez que ha modelado e implementado su sistema económico artificial, deja que evolucione en el tiempo desde unas determinadas condiciones iniciales, permitiendo que los agentes interactúen repetidamente y aprendan de estas interacciones.

complejidad de un fenómeno, y que se concreta en el motto *Keep It Descriptive Stupid (KIDS)*, (Edmonds & Moss, 2005). Sin pretender entrar en esta discusión, sí debemos señalar que el trabajo de esta tesis responde al primero de los principios.

Como hemos comentado en el capítulo anterior, la Economía Evolucionista hasta mediados del siglo pasado había utilizado principalmente una descripción verbal de sus hipótesis y aproximaciones. Pero con el desarrollo de la ciencia computacional la Economía Evolucionista ha ido encontrando un medio para poder formalizar todo su conocimiento. ACE no es más que la formalización de este maridaje entre la Economía Evolucionista y la Ciencia Computacional.

En mayor o menos grado, muchos de los trabajos sobre ACE incorporan los elementos clave de la aproximación evolucionista:

- La dimensión de población es muy importante en ACE, se evita utilizar niveles de agregación del comportamiento de los agentes o recurrir a agentes representativos. La economía es modelada como un sistema distribuido formado por individuos heterogéneos, tal y como define la Economía Evolucionista el concepto de *diversidad*.
- La ACE subraya la dimensión interactiva entre los agentes económicos, que se concreta en relaciones de comercio, cooperación y competición. Como resultado de estas interacciones, la diversidad de agentes evoluciona hacia estados donde aquellos individuos que exhiben un comportamiento más adaptado multiplican su peso en la población, tal y como interpreta la Economía Evolucionista mediante los procesos de *selección*.
- Por último, la característica adaptativa de los sistemas económicos descritos por ACE representa la última pieza del puzzle evolucionista, que denominamos procesos de *desarrollo*. Ya sea porque los agentes aprenden y modifican sus comportamientos, ya sea porque son creativos e innovan nuevos comportamientos, los procesos de desarrollo son necesarios para alimentar la dinámica evolutiva del sistema económico.

En nuestra opinión, mediante ACE podemos ofrecer descripciones de los fenómenos económicos (agentes, comportamientos, relaciones, instituciones) mucho más próximos a la realidad que la aproximación económica clásica. Si bien, al igual que ocurre con la Economía Evolucionista, todavía sigue siendo una disciplina muy heterogénea carente de un cuerpo teórico completo, como sí tiene la Economía clásica.

3.3.2 Objetivos de ACE

Un programa de investigación sobre ACE puede clasificarse en función del tipo de objetivo que persiga⁸⁷ (Tsfatsion, 2006):

- Una línea de *investigación empírica* se plantea cuestiones como por qué los sistemas económicos exhiben patrones regulares de comportamiento, a pesar de que no existen mecanismos claros de planificación y control centralizados. Más bien al contrario, los fenómenos económicos se caracterizan por su naturaleza distribuida. Entre los ejemplos de estas regularidades o *stylized facts* tenemos: las redes de comercio, la distribución del tamaño de las empresas, la estructura de los mercados y las industrias, las aglomeraciones industriales, la difusión y adopción de innovaciones tecnológicas, etc. ACE puede aportar explicaciones de cómo emergen este tipo de patrones a partir del comportamiento individual de los agentes económicos (LeBaron, 2006; Epstein, 2006; Dawid, 2006).
- Una línea clásica en la Economía que también aborda ACE es la *investigación normativa*. ACE permite implementar laboratorios económicos donde poder comprobar mediante simulación los efectos de diferentes políticas económicas, estructuras de negociación y comercio, diseño de mercados, regímenes de innovación tecnológica, etc. (Marks, 2006; Janssen & Ostrom, 2006).
- También ACE se utiliza para la *investigación teórica*. Cualquier modelo ACE nos puede facilitar la comprensión de un fenómeno económico, los mecanismos que intervienen y cómo evoluciona en el tiempo. El investigador teórico persigue en definitiva comprender el funcionamiento de los sistemas económicos así como caracterizar sus propiedades (Arthur, 2006; Young, 2006; Chang & Harrington, 2006).
- Por último, tenemos una línea de *investigación metodológica* que se preocupa de estudiar los métodos y las herramientas necesarias para poder llevar a cabo esta investigación económica mediante simulación computacional basada en agentes. En esta línea se incluyen los estudios sobre técnicas análisis y visualización de datos de simulación, herramientas de verificación y validación de modelos,

⁸⁷ Esta clasificación de objetivos de ACE se complementa con el repaso a las principales líneas de investigación que desarrollamos en el siguiente apartado.

aplicaciones para el diseño e implementación de modelos basados en agentes, etc. (Axelrod, 1997a; Axelrod, 2006; Duffy, 2006).

3.3.3 Principales líneas de investigación sobre ACE

A pesar de las diferencias sustanciales en los principios y metodología del ACE y la Economía clásica, esta nueva corriente de investigación está ganando cada vez más simpatizantes⁸⁸. Si bien, el campo de aplicación del modelado basado en agentes a temas económicos es muy amplio y heterogéneo, nos parece interesante citar algunos trabajos para describir las principales líneas de investigación actuales dentro de ACE⁸⁹. De esta forma podemos hacernos una idea de las capacidades que ofrece esta metodología y el despliegue de sus posibilidades futuras.

Aprendizaje y ciencia cognitiva

Muchos de los trabajos sobre ACE integran en sus modelos diferentes aproximaciones provenientes de la Inteligencia Artificial para poder modelar la capacidad de aprendizaje de los individuos, por ejemplo los algoritmos genéticos (Dawid, 2006), las redes neuronales (Luna, 2002), o el aprendizaje reforzado (Santos *et al.*, 2007b).

En el diseño de sociedades artificiales, el investigador ha de plantearse cómo modelar el comportamiento de los individuos, e inevitablemente ha de proponer alguna aproximación sobre una de sus capacidades más sobresalientes como es el aprendizaje. Claro que esto no es una tarea sencilla: no existe un consenso sobre cómo son los procesos cognitivos de las personas, ni una formulación computacional más adecuada que otra, y lo más importante, muchas veces se desconoce el grado en que este tipo de decisiones pueden influir en el comportamiento global de un sistema computacional.

Muchas de las técnicas algorítmicas antes mencionadas fueron creadas inicialmente con el propósito de resolver problemas objetivos de forma eficiente y supuestamente inteligente, y no para modelar explícitamente los procesos cognitivos de

⁸⁸ Una prueba de la importancia que está adquiriendo ACE la encontramos en la reciente publicación de un manual de referencia sobre la economía computacional (Tsfatsion & Judd, 2006).

⁸⁹ Para una revisión más profunda sobre es estado actual de investigación sobre ACE ver Tsfatsion (2001b; 2002; 2003).

las personas. Por ello, debemos ser prudentes a la hora de integrarlas e implementarlas en los modelos económicos⁹⁰. En este sentido Dawid (Dawid, 1999), que utiliza algoritmos genéticos para modelar la evolución de las estrategias de los agentes, pone en evidencia cómo pequeñas decisiones sobre la implantación de estas técnicas pueden tener un significativo efecto en los resultados.

En ocasiones, no siempre la técnica algorítmica más compleja es la que mejores resultados ofrece. Rust (Rust *et al.*, 1994) compara diferentes algoritmos de negociación utilizados en subastas dobles y demuestra como una sencilla estrategia de puja en el último minuto logra siempre mejores resultados que muchas otras implementaciones más elaboradas. Incluso cuando se analizan los sistemas económicos desde un punto de vista global, podemos llegar a conclusiones realmente sorprendentes. Gode y Sunder (Gode & Sunder, 1993) demuestran que en un modelo de subasta doble continua agentes con comportamientos muy simples, que denominan *zero intelligence*, son suficientes para hacer que el sistema converja a soluciones de máxima eficiencia del mercado.

Evolución de normas sociales

Un fenómeno muy interesante que se estudia en las Ciencias Sociales, y que tiene también su influencia en los procesos económicos, son las *normas*⁹¹. Las cuestiones más importantes son: cómo emergen estas normas en las sociedades, cómo evolucionan a lo largo del tiempo, cómo influyen en el comportamiento de los agentes, y cómo a su vez el comportamiento de los individuos puede hacer que una norma termine por desaparecer siendo sustituida por otra.

Existe una gran cantidad de trabajos que abordan las normas sociales utilizando la aproximación ACE. Por ejemplo, Epstein (Epstein, 2001) estudian mediante

⁹⁰ Claro está, que a esta misma dificultad ha de enfrentarse cualquier aproximación a los fenómenos económicos, pues de una forma u otra ha de modelar el comportamiento y la toma de decisiones de los agentes económicos. Podría criticarse la falta de fundamentación teórica de algunos modelos ACE a la hora de justificar cómo modelan los procesos cognitivos de los agentes, pero no es menos cierto que la aproximación de la Economía clásica considerando a los individuos como seres perfectamente racionales choca con cualquier estudio empírico sobre cómo se comportan realmente las personas (Simon, 1982; Hernandez, 2004).

⁹¹ Axelrod define una norma como aquella pauta social de comportamiento comúnmente aceptada por todos los individuos de una sociedad, cuyo incumplimiento acarrea el correspondiente castigo del grupo al infractor (Axelrod, 1997b).

simulación como el esfuerzo individual para pensar y cuestionar una norma es inversamente proporcional a la importancia social de la misma. Axtell (Axtell *et al.*, 2000) estudia cómo emergen las normas en sociedades de individuos que interactúan descentralizadamente.

Mercados

Probablemente la aplicación más extendida de ACE es el estudio de los mercados. Las cuestiones que se abordan en estos trabajos son principalmente la de explicar los principales fenómenos que emergen en los mercados reales, a los que la teoría económica clásica no encuentra una explicación formal.

Una importante corriente de esta investigación se ha centrado en el modelado de mercados financieros artificiales (LeBaron, 2000). Mediante modelos basados en agentes, que capturan el comportamiento real de los inversores, se pretende explicar regularidades que emergen en los mercados reales como los excesos de volatilidad, las burbujas financieras, o las infra y sobre reacciones (Pascual *et al.*, 2003a; Pajares *et al.*, 2003a).

También se pueden estudiar los mercados mediante simulación basada en agentes desde un punto de vista normativo. Un caso muy interesante son los mercados de subastas, donde suelen concurrir un número pequeño de compradores y vendedores con diferentes tamaños y poderes de negociación, y en los que no resulta fácil anticipar el comportamiento global del mercado y su eficiencia. Algunos ejemplos de esta línea de trabajo son el estudio del mercado eléctrico de subastas (Posada *et al.*, 2005a), o el mercado europeo de permisos de emisión (Posada *et al.*, 2004a).

Redes sociales

Aunque podríamos interpretar que las interacciones entre los agentes en los sistemas económicos son aleatorias, la realidad de muchos de los fenómenos económicos nos dice que cada agente suele interactuar preferentemente con un pequeño grupo del conjunto de la sociedad. Esta propiedad social representa la pieza angular del estudio de las redes sociales que caracterizan el espacio de relaciones de las personas (Newman, 2003).

Desde un punto de vista económico, resulta muy interesante estudiar como diferentes topologías de relaciones sociales pueden condicionar los fenómenos económicos. Algunos trabajos sobre ACE analizan el efecto de distintos tipos de redes sobre fenómenos económicos como las negociaciones bilaterales (Wilhite, 2001), o los procesos de innovación (Santos *et al*, 2007a). Igualmente interesante puede ser estudiar cómo emergen diferentes tipos de redes en función del comportamiento de los agentes económicos, por ejemplo en el mercado laboral (Tsfatsion, 2001a), o en redes de colaboración (Santos *et al*, 2007b).

Modelado de organizaciones

Tradicionalmente la teoría sobre las organizaciones sociales y económicas ha adolecido de falta de modelos formales (analíticos o de simulación). Sin embargo el desarrollo de ACE está permitiendo formalizar muchas de las teorías sobre organizaciones expresadas verbalmente (Prietula *et al*, 1998). Normalmente, el principal interés se centra en analizar los efectos que cada tipo de organización tienen en sus resultados.

Herramientas de diseño e implementación de modelos ACE

Uno de los principales obstáculos en la difusión y aceptación de las técnicas de modelado y simulación ACE reside en la dificultad de implementar los modelos en un computador, pues exige dominar las técnicas de programación. Es por ello que existe una corriente de investigación orientada al desarrollo de nuevas herramientas que faciliten esta tarea.

En este campo podemos identificar tres grandes líneas de trabajo. La primera se ellas aprovecha la modularidad que ofrecen la mayoría de los lenguajes de programación de alto nivel para desarrollar librerías que faciliten la tarea de implementación y análisis de modelos. Ejemplos de esto lo encontramos en las librerías de modelado y simulación *Repast* (North *et al.*, 2006), *Mason* (Luke *et al.*, 2005) o *Swarm*⁹². Una segunda corriente pretende desarrollar entornos de diseño *ad hoc* que faciliten todo el proceso de modelado e implementación, como por ejemplo la

⁹² <http://www.swarm.org/>

herramienta *Netlogo*⁹³ o *Ingenias* (Sansores & Pavón, 2005). La última línea de trabajo agrupa los esfuerzos por desarrollar aplicaciones a modo de laboratorios para el modelado en dominios de aplicación específicos, como por ejemplo *Laboratory for Simulation Development (Lsd)*⁹⁴, o *Trade Network Game Lab (Tng)*⁹⁵.

3.3.4 ¿Qué puede aportar ACE a la Geografía Económica?

La naturaleza de los fenómenos que aborda la Geografía Económica nos invita a tener en cuenta en su estudio muchos más elementos que los que contempla la aproximación económica clásica. Hemos encontrado en la teoría económica evolucionista el marco de trabajo adecuado desde el que iniciar nuestra búsqueda; y hemos descubierto las posibilidades que el modelado basado en agentes ofrece para formalizar y concretar esta investigación⁹⁶. Sin embargo no existe todavía un claro programa de investigación sobre ACE y Geografía Económica, aunque estamos seguros de que ambas corrientes están llamadas a entenderse.

En nuestra opinión ACE constituye una metodología especialmente interesante para abordar el estudio de los fenómenos económico-espaciales. Vamos a tratar de defender esta afirmación desde diferentes puntos de vista (Santos *et al*, 2005).

1. Desde una perspectiva metodológica porque son expresión de una metodología *bottom-up* que se adapta mejor al estudio y comprensión de sistemas adaptativos complejos.
2. Desde una perspectiva de modelado de fenómenos económico-geográficos porque permite:
 - Un proceso de modelado más fiel a la realidad, por cuanto recoge con más detalle las características de los agentes y el entorno. Podemos construir modelos contextualizados, donde el comportamiento de los agentes depende

⁹³ <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

⁹⁴ <http://www.business.aau.dk/~mv/Lsd/lzd.html>

⁹⁵ <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/tng/home.htm>

⁹⁶ Evidentemente la Economía Evolucionista no es sinónimo de modelado y simulación basada en agentes, aunque en la literatura reciente constatamos como la metodología ABM ha sido incorporada en muchos proyectos de investigación evolucionistas.

de los factores geográficos, económicos, sociales y culturales observados en los fenómenos reales.

- Desarrollar las teorías evolucionistas modelando la micro diversidad y los procesos de selección e innovación que explican los fenómenos de innovación, cambio tecnológico, aglomeración, así como los fenómenos de dependencia histórica.
- Crear modelos completos sin tener que recurrir a variables exógenas, ya que la dinámica del sistema está dirigida únicamente por las interacciones entre los agentes.
- Integrar el espacio geográfico como elemento activo de los modelos.
- Modelar fenómenos como las externalidades de conocimiento y los procesos de difusión de conocimiento, tan importantes en los fenómenos de innovación, a partir de la interacción local de los individuos.

3. Desde una micro perspectiva, que mira con detalle los actores que intervienen, porque permite:

- Modelar la diversidad de agentes, los individuos (consumidores, trabajadores, emprendedores), los grupos (empresas, familias, organizaciones) o las instituciones (mercados, regiones).
- Captar la individualidad de cada agente, sus relaciones e interacciones, así como modelar su comportamiento, caracterizado por la racionalidad limitada en la toma de decisiones y por procesos de aprendizaje endógenos.
- Aprovechar las aportaciones de otras ramas de la *Inteligencia Artificial* que han desarrollado diferentes estrategias para modelar los procesos de aprendizaje de las personas (algoritmos genéticos, redes neuronales).
- Modelar no solo la proximidad geográfica, sino también otros niveles de proximidad como la proximidad cognitiva, o la proximidad social a través de las redes sociales tan importantes en los fenómenos de difusión de conocimiento.

4. Y por último como herramienta computacional porque permite:

- Construir herramientas de simulación, a modo de laboratorios experimentales, con los que poder hacer investigación teórica, positiva y normativa.
- Integrar los modelos basados en agentes con los *sistemas de información geográfica (GIS)*, para desarrollar modelos de simulación de entornos reales.
- Realizar estudios más sistemáticos de los diferentes factores que determinan las economías de aglomeración, simulando sus efectos conjuntamente y por separado.

Aunque no debemos obviar alguna de las *dificultades* que el modelado basado en agentes presenta, y que ya comentamos en su momento cuando hablamos de verificación validación y replicación en el apartado 3.2.4 de este capítulo. Aquellos que desean utilizar estas técnicas de simulación han de ser conscientes de la complejidad de las diferentes etapas de abstracción, implementación y simulación, así como de las repercusiones que posibles errores en ellas pueden tener en los resultados finales. A diferencia de otras metodologías, el modelado basado en agentes requiere de técnicas de validación a través de la replicación de modelos, la repetición de experimentos y la comparación de resultados.

3.3.5 ACE y fenómenos de aglomeración industrial

Esta sección debería estar dentro del apartado 3.3.3 que recoge las principales líneas de investigación ACE. Sin embargo, puesto que el interés de esta tesis se centra en una aproximación evolucionista a los fenómenos de aglomeración industrial mediante el modelado basado en agentes, hemos considerado más interesante dedicarle un lugar diferente.

La utilización de ACE en el estudio de fenómenos económico-espaciales constituye una línea de investigación todavía muy inmadura y terriblemente heterogénea. En general, encontramos en estos trabajos la ausencia de un cuerpo teórico formal universalmente aceptado por todos, entre otras razones, porque el paradigma evolucionista que alimenta esta investigación carece también de ese consenso formal. Si

resulta difícil establecer qué trabajo es puramente evolucionista, todavía es más complicado distinguir cuáles responden a los principios del ACE⁹⁷.

Además, nos encontramos una gran diversidad de temas que tienen una mayor o menor vinculación con la Geografía Económica, y que son abordados de manera muy desigual. Todo esto dificulta cualquier intento por confeccionar una lista de trabajos de investigación sobre ACE y fenómenos de aglomeración industrial que pudiera ser representativa de esta línea de investigación. Aun así, y a modo de ilustración de lo que se está haciendo actualmente, podemos destacar las siguientes grandes líneas de trabajo⁹⁸.

Economías de aglomeración

La primera gran línea de investigación es la que aborda la cuestión de las economías de aglomeración: los beneficios que los agentes económicos disfrutaban por el hecho de realizar sus actividades en proximidad. Un concepto bastante ambiguo, y que fácilmente puede llevar a explicaciones un tanto tautológicas como decir que las empresas se concentran en un lugar porque juntas tienen más ventajas.

La evidencia empírica es que existen fenómenos de aglomeración, ahora bien, otra cosa es tratar de dar una explicación a este hecho, y además hacerlo a partir de una descripción del comportamiento individual de los agentes. Un intento puede ser el trabajo de Brusco *et al* (2002), quienes proponen un modelo de cluster industrial sobre la hipótesis de que un gran número de empresas pequeñas agrupadas en un área geográfica pueden disfrutar de los beneficios de las grandes organizaciones, y además, adaptarse mejor y más rápidamente a cambios en la demanda.

Fioretti (2001) aborda otra cuestión con su estudio sobre un distrito industrial italiano dedicado a la industria textil. En su modelo, las ventajas del cluster radican en la división del proceso productivo entre muchas empresas pequeñas. Esta organización del sistema productivo introduce una gran competitividad que favorece los productos

⁹⁷ En nuestra opinión, la utilización de la simulación computacional no es una característica suficiente para afirmar que un trabajo pertenece a ACE.

⁹⁸ Los siguientes trabajos son un ejemplo de la heterogénea aplicación del ACE a los fenómenos de aglomeración industrial. Una recopilación algo más completa se puede encontrar en (Fioretti, 2005).

fabricados en el cluster, y además permite el desarrollo de una gran diversidad de variedades de productos.

Dinámica industrial e innovación

Modelar la dinámica de una industria teniendo en cuenta su dimensión espacial constituye una tarea bastante compleja, por lo que no es de extrañar que existan diferentes aproximaciones a este problema⁹⁹.

Zhang (2003) centra la atención del investigador en la figura del emprendedor. Propone un autómata celular para explicar la dinámica de creación de un cluster tecnológico, semejante al conocido cluster de Silicon Valley. El mecanismo de aglomeración se construye sobre un sencillo proceso de imitación, por el que la creación de una empresa suele estar seguida de iniciativas semejantes que surgen del entorno geográfico del emprendedor.

Brenner (2001) desarrolla un complejo modelo de cluster industrial también sobre un diseño de autómata celular. Este trabajo intenta estudiar los efectos de diferentes fenómenos como los spin-offs, knowledge spillovers, la mano de obra cualificada o las políticas locales sobre la evolución de un cluster industrial.

Otter *et al* (2001) estudia el fenómeno de la aglomeración desde la perspectiva del uso y distribución del suelo. Propone un modelo basado en agentes para simular los procesos de decisión de dos tipos de agentes, empresas y familias, y cómo estas decisiones afectan a la distribución de las actividades económicas en el espacio geográfico.

Un elemento fundamental de la dinámica de toda industria es su actividad innovadora, que muestra una clara dependencia geográfica (Feldman, 1994). En nuestra opinión, ACE puede aportar mucho en esta línea de investigación en la medida en que permite formalizar muchas de las ideas propuestas por la Geografía de la Innovación, como por ejemplo la proximidad –geográfica, cognitiva y social– que influye en los procesos de innovación, difusión y aprendizaje de conocimiento (Santos *et al*, 2007b).

⁹⁹ Una de ellas es la que venimos construyendo desde el comienzo de esta tesis, cuyos principios teóricos difieren de los utilizados en los trabajos que mencionamos bajo este epígrafe.

Gilbert (Gilbert *et al.*, 2001) trascienden la tradicional dimensión espacial para centrarse en la dimensión social de los procesos de innovación en las industrias. Para ello, definen un modelo basado en agentes de una red de innovación, donde el éxito en las innovaciones depende en gran medida de la capacidad de los agentes de establecer relaciones de cooperación con el resto. Con este modelo explican porqué existe una mayor colaboración en las redes de investigación de muchas industrias.

Diseño de políticas

Otra de las líneas de aplicación de ACE se centra en el estudio de las políticas económicas y su impacto en los clusters industriales. Las políticas sobre desarrollo industrial representan un apartado clave en la agenda de muchas administraciones y gobiernos regionales y locales. Son muchas y muy interesantes las cuestiones que se plantean en este apartado: ¿cómo afectan el desarrollo de infraestructuras de comunicaciones y tecnológicas?, ¿qué es más beneficioso para una región un parque industrial o varios?, ¿cómo influyen las políticas de I+D+i en el desarrollo industrial de las regiones?

Squazzoni y Boero (2002) utilizan un modelo basado en agentes de un distrito industrial para experimentar mediante simulación el impacto sobre la industria de diferentes políticas regionales que afectan a la investigación, difusión y transferencia tecnológicas.

Coelho y Schilperoord (2003) van un paso más adelante del modelado y simulación, proponiendo un sistemas de soporte a la decisión basado en agentes para la gestión de los parques tecnológicos y científicos. La preocupación de los autores se centra en la gestión del conocimiento y la innovación en los parques tecnológicos, y cómo determinadas decisiones de gobierno pueden favorecer las capacidades de innovación de las empresas situadas en el parque.

3.4 Discusión

En este capítulo hemos definido el concepto de Sistemas Complejos Adaptativos (SAC), que nos permite construir toda una nueva metodología de investigación de fenómenos complejos, que supera las limitaciones de las técnicas analíticas

tradicionales. El elemento clave de los SAC es el agente, unidad constituyente del sistema, en torno al cual se orienta todo el proceso de investigación.

El modelado basado en agentes (ABM) y la simulación computacional son la expresión práctica del paradigma de los SAC. ABM va más allá del aprovechamiento de la cada vez mayor capacidad computacional, de representación gráfica y de integración de información. Están contruidos sobre una aproximación bottom-up que permite un modelado más fiel a la realidad, por cuanto recogemos con más detalle las características de las partes que lo integran, y además desarrollar herramientas a modo de laboratorios experimentales muy deseables en disciplinas científicas como las ciencias sociales.

La integración de esta metodología de investigación con los principios evolucionistas ha dado origen a una incipiente disciplina dentro de la Economía que denominamos Economía Computacional basada en Agentes (ACE). En nuestra opinión, ACE tiene una prometedora línea de investigación en los fenómenos de aglomeración y dinámica industrial que estudia la Geografía Económica.

ACE permite superar muchas de las dificultades inherentes al estudio de la complejidad de los fenómenos económico-espaciales y además nos ofrece un deseable y necesario punto de encuentro para el diálogo entre disciplinas heterogéneas como la Geografía Económica, la Nueva Geografía Económica y la Economía Evolucionista.

“No se puede descender dos veces por el mismo río, pues cuando descendiendo el río por segunda vez, ni yo ni el río somos los mismos”

Heráclito (544 adC - 484 adC)

Capítulo 4

Modelo evolucionista de una industria innovadora y diferenciada

Este capítulo resume la aportación fundamental del trabajo de esta tesis: una formalización de las diferentes teorías sobre los fenómenos de aglomeración y concentración industrial, estudiadas en capítulos anteriores, en un modelo de simulación computacional basado en agentes. Como en muchos de los modelos evolucionistas de dinámica industrial, la innovación juega un papel fundamental como motor de transformación y desarrollo de la industria, pero a diferencia de ellos, damos un paso adelante al tener en cuenta también la evolución espacial de la industria.

El modelo ha sido implementado en REPAST¹⁰⁰ (North *et al.*, 2006), un conjunto de librerías Java que conforman una herramienta de modelado basado en agentes. La elección de REPAST se debe a que es una herramienta de modelado ampliamente validada y utilizada por la comunidad científica que, a nuestro juicio, facilita la implementación y el análisis de cualquier modelo computacional basado en agentes.

El capítulo está organizado de la siguiente forma. En el primer apartado resumimos las principales limitaciones que, a nuestro juicio, tienen los modelos propuestos por la Nueva Geografía Económica y la Economía Evolucionista. Una crítica que constituye nuestra principal motivación para la realización de esta tesis.

En el segundo apartado diseñamos un marco teórico sobre el que poder construir un modelo de Geografía Económica Evolucionista. Partimos de los principios de la

¹⁰⁰ REcursive Porous Agent Simulation Toolkit.

Economía Evolucionista y los integramos junto con otras teorías provenientes de la Geografía Económica, para definir finalmente lo que en nuestra opinión constituye la causalidad acumulativa que explica muchos de los fenómenos de aglomeración industrial.

En el tercer apartado describimos completamente nuestro modelo evolucionista de una industria innovadora y diferenciada. Representa un parte muy importante, por cuanto formalizamos las aproximaciones teóricas propuestas en el apartado anterior en el conjunto de procedimientos que describen el comportamiento de los agentes del modelo.

Finalmente en el último apartado, hacemos una síntesis de las analogías y diferencias teóricas existentes entre el modelo propuesto en este capítulo y los modelos de la Nueva Geografía Económica y la Economía Evolucionista.

Además nos ha parecido importante recoger en forma de anexo la descripción algorítmica del modelo, que ha sido utilizada en la implementación del mismo en REPAST.

4.1 Limitaciones de modelos previos

En los capítulos 1 y 2 hemos revisado las propuestas teóricas hechas desde la Nueva Geografía Económica y de la Economía Evolucionista. En estos dos capítulos no solo pretendíamos describir un estado del arte de lo que en nuestra opinión representan dos áreas de investigación económicas muy importantes sobre los fenómenos de aglomeración y concentración industrial, sino también proponer y discutir los fundamentos teóricos sobre los que llevar a cabo esta investigación.

La Figura 3 resume los pasos que hemos seguido en esta tesis para finalmente realizar una propuesta novedosa al estudio de los fenómenos de aglomeración industrial, en forma de un modelo basado en agentes. Los fundamentos de nuestro modelo son claramente evolucionistas y tratan de ser fieles a los principios evolucionistas contenidos en los trabajos de Nelson y Winter (1982). Aunque discrepamos enormemente de la aproximación analítica que ofrece la Nueva Geografía Económica,

entendemos que algunas de sus aportaciones son interesantes y por ello las hemos tenido en cuenta en nuestra propuesta.

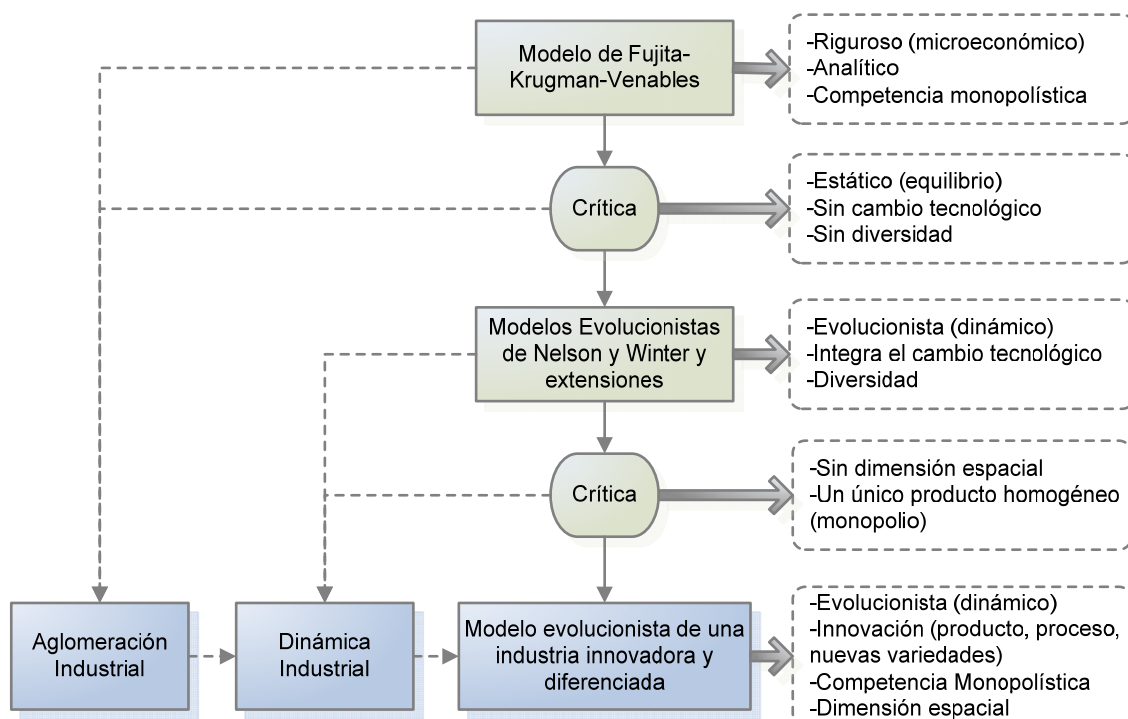


Figura 19. Proceso de investigación de esta tesis.

Revisión crítica de la aproximación de la Nueva Geografía Económica y la Economía Evolucionista a los fenómenos de aglomeración y concentración industrial, y propuesta de un modelo evolucionista de una industria innovadora y diferenciada.

4.1.1 Modelo de Fujita-Krugman-Venables

La piedra angular sobre la que Fujita, Krugman y Venables (1999) desarrollan sus modelos de geografía económica es la aproximación del sistema económico a un sistema en equilibrio y homogéneo. Esta hipótesis, sin la cual sería imposible proponer y resolver su modelo analítico, se concreta en la utilización de una empresa representativa homogénea que no cambia durante el tiempo, de igual forma que también permanecen invariables el comportamiento y las preferencias de los consumidores.

A diferencia de otros problemas económicos, donde la corriente microeconómica mayoritariamente aceptada plantea argumentos semejantes, la dimensión temporal de los fenómenos de aglomeración económica es especialmente importante. En nuestra opinión, no podemos aceptar una aproximación que considera

que nada cambia durante todo un proceso de creación y desarrollo, por ejemplo, de un cluster industrial. Muchos estudios empíricos sobre fenómenos de aglomeración evidencian las transformaciones que experimentan los agentes económicos (Saxenian, 1994), una evolución que no puede ser obviada en un modelo por muchas ventajas que su simplificación ofrezca al investigador.

Otra crítica importante que puede realizarse a la Nueva Geografía Económica es que toda la dimensión geográfica se resume en el parámetro *coste de transporte*. Como ya vimos en el capítulo 1, si el coste de transporte es significativamente bajo, el único estado de equilibrio posible es la aglomeración (estructura núcleo-periferia). En nuestra opinión, cuando abordamos el estudio de la aglomeración de industrias de carácter tecnológico, con una fuerte dependencia el factor conocimiento, la variable coste de transporte no resulta significativa, y sí aparecen como importantes otros elementos geográficamente dependientes como son los *knowledge spillovers* (Audretsch & Feldman, 1996).

4.1.2 Familia de modelos evolucionistas de Nelson y Winter

La mayor parte de los trabajos evolucionistas sobre dinámica industrial extienden, en mayor o menor grado, la familia de modelos evolutivos propuestos por Nelson y Winter (1982). Ya vimos en el capítulo 2 que la industria es modelada como un conjunto de empresas que compiten en la fabricación y venta de un único producto homogéneo. Como resultado de esta simplificación, la evolución natural de la industria tiende hacia un estado de monopolio, que se alcanza o no en función de la dinámica de entrada de nuevas empresas que contemple el modelo¹⁰¹.

Sin embargo, la realidad de muchas industrias suele estar bastante alejada de esta hipótesis de homogeneidad del producto. En nuestra opinión, esta simplificación puede acarrear un sesgo importante cuando estudiamos la dinámica de concentración espacial de las industrias, en las que la diversificación de la cartera de productos que fabrican las

¹⁰¹ Kwasnicki (1996) introduce la innovación de producto que posibilita que los productos de cada empresa se diferencien en sus características técnicas. Sin embargo, todos compiten por unas mismas preferencias del consumidor, y la dinámica replicadora que describe el proceso de selección es semejante a los modelos de Nelson y Winter (1982). Como resultado de ello, de no mediar nuevas entradas de empresas en la industria, la evolución tiende también a un estado de monopolio.

empresas representa un factor de crecimiento y de concentración industrial (Frenken & Boschma, 2007).

Hemos comentado en su momento, que si bien la incorporación del factor geográfico y espacial en la Economía Evolucionista representa un paso casi natural y lógico (Boschma & Lambooy, 1999), este programa de investigación está todavía por desarrollar, tanto en la investigación empírica como en la teórica mediante la propuesta de modelos formales. Por esta razón muchos de los modelos evolutivos de dinámica industrial, descritos en el capítulo 2, no contemplan la dimensión espacial. Sin lugar a dudas, este hecho abre una prometedora línea de investigación, donde podemos incluir el trabajo de esta tesis.

4.2 Fundamentos de un modelo de Geografía Económica Evolucionista

En esta sección queremos desarrollar las bases teóricas sobre las que, a nuestro juicio, construir un modelo de Geografía Económica Evolucionista. Frenken y Boschma (2007) hacen una interesante integración entre algunas teorías evolucionistas sobre dinámica industrial y teorías geográficas sobre crecimiento urbano, para proponer un marco teórico sobre el que desarrollar modelos geográficos y evolucionistas. Su análisis nos ha orientado en el desarrollo de los fundamentos teóricos de nuestro modelo, que se resumen en los siguientes apartados.

4.2.1 La unidad de estudio: la empresa

Algunos autores defienden que desde un punto de vista evolucionista la unidad de estudio en la geografía económica debe ser la empresa (Maskell, 2001; Boschma, 2004). Nosotros compartimos esta hipótesis de trabajo y por ello nuestro modelo basado en agentes tiene como principal protagonista a la empresa¹⁰².

Centrar la atención en la empresa no supone dejar de lado otras variables puramente geográficas, como la diversidad cultural, social e institucional propias de

¹⁰² El objetivo de nuestro modelo es explicar los fenómenos de aglomeración industrial como resultado del comportamiento individual de las empresas que entran, crecen y salen de una industria.

cada región¹⁰³. Una de las características de la empresa es que está ubicada en una localización concreta, lo que puede condicionar su evolución positiva o negativamente. Sin embargo, la presión de selección que ejerce el mercado, en un contexto cada vez más internacionalizado por el fenómeno de la globalización, opera siempre sobre las empresas de la industria. Como resultado, aquellas organizaciones que disfrutaban de ventajas competitivas prosperan y consecuentemente las regiones donde desarrollan sus actividades. Dicho de otra forma, hay regiones más competitivas que otras porque albergan empresas más competitivas que tienen más éxito en la selección que impone el mercado.

4.2.2 Rutinas

La Economía Evolucionista discrepa enormemente de la visión clásica de la empresa como un agente optimizador, que dispone de información perfecta y exhibe un alto grado de comportamiento estratégico. Por el contrario, considera a la empresa como una organización compleja que toma decisiones en base a sus capacidades, conocimiento y experiencia, aspectos sintetizados en el concepto evolucionista de rutinas.

Desde un punto de vista evolutivo, las rutinas de una empresa constituyen una característica individual, propia de cada organización, muy importante en el proceso de selección. Continuando con este argumento, podemos decir que la Geografía Económica no hace más que ocuparse en gran medida del estudio de la evolución espacial y temporal de estas rutinas (Frenken & Boschma, 2007). Para abordar esta evolución, no sólo debemos tener en cuenta los procesos de selección, sino también los procesos de creación (innovación) y difusión (replicación) de este conocimiento.

Las rutinas que describen el comportamiento de una empresa son expresión del conocimiento de la organización que hay ido aprendiendo y modelando de acuerdo a su experiencia y trayectoria histórica¹⁰⁴. La naturaleza de las rutinas, tácita y no

¹⁰³ Con el propósito de no complicar en exceso el modelo evolucionista que proponemos en esta tesis, hemos simplificado esta dimensión, más puramente geográfica, para centrar nuestro análisis en aquellos aspectos económicos como los procesos de innovación o los *knowledge spillovers*.

¹⁰⁴ Una definición de rutina la encontramos en (Cohen *et al*, 1996): “una capacidad ejecutable de actuación en un determinado contexto, que ha sido aprendida por una organización en respuesta a presiones selectivas del entorno”.

codificable, hace que sea la interacción personal el medio principal de difusión (replicación) de este conocimiento. Habitualmente se habla de tres formas de replicación: dentro de la empresa, conforme ésta crece y diversifica su actividad (Winter & Szulanski, 2001); fuera de la empresa mediante los *spin-offs*¹⁰⁵ (Klepper, 2001); y a través de la movilidad laboral entre empresas¹⁰⁶.

Todas estas vías de replicación tienen una clara dependencia geográfica, en la medida en que ocurren en un entorno geográfico *próximo* a la empresa. Esta circunstancia acentúa la dimensión geográfica de los procesos de selección en la industria, que hemos explicado en el apartado anterior. Aquellas empresas próximas a organizaciones con éxito tienen más posibilidades de *aprender* y mejorar, y consecuentemente incrementar la competitividad de la región donde están ubicadas.

4.2.3 Innovación y diferenciación de productos

Las empresas apuestan por la mejora de los productos que fabrican (innovación de producto¹⁰⁷) y por la mejora de sus procesos productivos (innovación de proceso) como medio de crecimiento. Sin embargo, los beneficios que la empresa obtiene de un producto decrecen con el tiempo, conforme la vida del mismo alcanza su madurez, en el mercado aparecen productos sustitutivos y las preferencias de los consumidores van evolucionando. Por esta razón, las empresas también buscan desarrollar nuevos productos para sostener y aumentar su crecimiento (Penrose, 1959).

El crecimiento económico de las empresas y las regiones se sustentaría no solo en las innovaciones de proceso y mejoras en las características de los productos existentes, sino también en la creación y desarrollo de nuevas variedades de productos

¹⁰⁵ Empresas emergentes que nacen a partir de una empresa ya existente ya sea por una división de su actividad, o porque simplemente un grupo de trabajadores inicialmente vinculados a la empresa deciden crear una nueva. También reciben el nombre de *spin-off* aquellas empresas creadas a partir de Centros de Investigación y Universidades para desarrollar comercialmente los resultados de una investigación.

¹⁰⁶ En todos estos fenómenos las redes sociales condicionan el espacio de relaciones entre los individuos y juegan un papel fundamental en los procesos de difusión de conocimiento (Santos *et al*, 2007b).

¹⁰⁷ Esta clase de innovación que denominamos innovación de producto difiere con el concepto, bastante extendido, que se le suele dar. Dentro de la aproximación de competencia monopolística que incorporamos a nuestro modelo, hacemos una diferenciación clara entre una mejora en las características de un producto existente (innovación de producto) y la creación de un nuevo producto (innovación de nuevas variedades de producto). Esta separación puede parecer algo arbitraria, pero creemos que no más que otras interpretaciones sobre los tipos de innovación que también resultan discutibles.

que ofrecen a las empresas mayores cuotas de poder de monopolio dentro de la industria (Saviotti & Pyka, 2004).

Este proceso de expansión, por el que las empresas diversifican su cartera de productos creando generalmente nuevas divisiones productivas, lo llamaremos de ahora en adelante estrategia de *diferenciación de productos*. Esta diferenciación se corresponde con una visión de la industria más próxima a una competencia monopolística que a una dinámica de monopolio, tal y como la Economía Evolucionista ha venido modelando la dinámica industrial hasta el momento¹⁰⁸.

La dimensión geográfica de este proceso de diferenciación de productos se encuentra en que normalmente esta expansión ocurre preferentemente en la misma región donde se encuentra la empresa inicial¹⁰⁹. Podemos encontrar diferentes explicaciones a esto, como por ejemplo la dificultad de replicar las rutinas en otra ubicación con otros trabajadores diferentes, o la existencia de economías de escala que benefician la proximidad de las diferentes áreas y divisiones productivas de la empresa.

En ocasiones, la creación de una nueva variedad de producto viene de la mano del surgimiento de una nueva empresa *spin-off*, nacida de otra (padre) ya presente en la industria. También en estos casos las empresas *spin-offs* suelen establecerse preferentemente en la misma ubicación de la empresa padre (Klepper, 2001).

4.2.4 Selección y competencia monopolística

Ya hemos comentado que la realidad de muchas industrias se aleja bastante de la simplificación hecha en diferentes modelos evolucionistas de un mercado con un único producto, más o menos indiferenciado y homogéneo. A esto debemos añadir la tendencia general de las empresas a expandir sus actividades abarcando nuevos productos como medio de crecimiento (Penrose, 1959).

¹⁰⁸ Una de las novedades que introducimos con nuestro modelo evolucionista de dinámica industrial es la utilización de la aproximación de competencia monopolística de Dixit-Stiglitz (1977) con la que poder modelar la estrategia de diferenciación de productos de las empresas y la diversidad de preferencias de los consumidores.

¹⁰⁹ Habría que matizar la diferencia existente entre un proceso de diversificación por el que una empresa inicia una nueva línea de productos y la consiguiente creación de una nueva división empresarial, y los procesos de externalización de una parte de la actividad productiva presente en la empresa que suele ir acompañada por una reubicación de las plantas productivas.

La suposición de competencia monopolística supone que cada producto que fabrica una empresa le permite disfrutar de un cierto poder de monopolio, en la medida en que los consumidores diferencian *imperfectamente* este producto del resto. Evidentemente, este poder de mercado se ve limitado por la competencia con el resto de variedades de productos, y conforme la industria acoge un mayor número de variedades aumenta la presión de la selección sobre todas ellas.

La competencia monopolística también supone reconocer una tendencia natural en el comportamiento de los consumidores que podemos resumir en la preferencia por la variedad¹¹⁰. Expresándolo en términos microeconómicos, la utilidad de los consumidores tiende a aumentar con el número de variedades presentes en el mercado.

Una aproximación evolucionista a la variedad en los mercados puede hacernos descubrir su dimensión geográfica. La probabilidad de crear nuevas variedades de producto no solo depende del grado de conocimiento que posee una empresa, sino también de la diversidad del mismo, que está relacionada directamente con el número de variedades de productos que fabrique. En la medida en que este conocimiento es más diverso, aumenta la probabilidad de creación de nuevas ideas (productos) como recombinación de las viejas (Weitzman, 1998). Si trasladamos esta idea a la dimensión espacial, podemos observar una clara realimentación positiva: conforme una región acoge una mayor diversidad de empresas (que fabrican diversos productos) aumenta la posibilidad de que en la misma se creen nuevas empresas y productos diferentes (Frenken & Boschma, 2007).

4.2.5 Rendimientos crecientes en la innovación

La innovación constituye el motor del desarrollo de las empresas y la industria, permitiendo mejoras en las tecnologías de producción, mejoras en las características de los productos y la aparición de nuevas variedades en el mercado. Los procesos de innovación son por su propia naturaleza inciertos, suceden bajo condiciones de incertidumbre y competitividad empresarial (Pavitt, 2003).

¹¹⁰ Es el mismo efecto “*love-of-variety*” del modelo de competencia monopolística de Dixit-Stiglitz que utiliza hábilmente Fujita, Krugman y Venables (1999) para poder construir su aproximación analítica a los fenómenos de aglomeración espacial.

Los rendimientos crecientes están presentes en muchas de las actividades económicas (Arthur, 1994), y también en los procesos de innovación. Desde nuestro punto de vista la naturaleza estocástica de la innovación puede potenciar su efecto. Los rendimientos crecientes aparecen en las actividades de I+D+i que desarrollan las empresas, debidos principalmente a:

- Las economías de escala, más importantes cuanto mayores inversiones fijas requiera desarrollar las actividades de I+D+i de una industria.
- Las capacidades de una empresa para comprender y aprender nuevo conocimiento, que algunos autores resumen en el concepto *capacidad de absorción* de las empresas (Cohen & Levinthal, 1990).
- Las sinergias de conocimiento que pueden darse cuando la empresa diversifica su actividad desarrollando una cartera amplia de productos, que posibilita una recombinación de conocimientos con efectos positivos en los procesos de innovación (Weitzman, 1998).

La cuestión fundamental es que estos rendimientos crecientes tienen una clara dependencia geográfica. Pensemos por ejemplo que, las empresas generalmente concentran físicamente sus centros de I+D (Audretsch & Feldman, 1996); que la capacidad de absorción de una empresa mejora si dispone en su entorno de una oferta importante de mano de obra cualificada (Cohen & Levinthal, 1990); o que si existen sinergias de conocimiento, éstas ocurren principalmente a través de las interacciones personales que se desarrollan en proximidad geográfica.

4.2.6 Knowledge Spillovers localizados

Alfred Marshall (1890) fue uno de los primeros economistas que se interesó en los beneficios que las empresas disfrutaban por estar cerca unas de otras, aludiendo entre otros factores a las externalidades de conocimiento presentes en los distritos industriales. Los *knowledge spillovers* representan una externalidad positiva de conocimiento que tiene su origen principalmente en la movilidad de la mano de obra y en la difusión de conocimiento a través de contactos personales.

Muchos autores defienden su influencia en los procesos de innovación (Feldman, 1994) y consecuentemente en los fenómenos de aglomeración y

concentración industrial. Desde un punto de vista evolutivo las empresas que son capaces de crear conocimiento más rápidamente tienen una clara ventaja competitiva (Maskell & Malmberg, 1999b), por lo que cualquier fenómeno que afecte a la creación y difusión de conocimiento en las empresas estaría de hecho condicionando los procesos de selección y desarrollo de la industria.

No resulta difícil ver la dependencia geográfica de estos fenómenos de difusión de conocimiento. Cuando la naturaleza del conocimiento es más tácita, y por tanto difícilmente codificable, éste se difunde más fácilmente a través de los contactos interpersonales, que requieren de proximidad¹¹¹.

4.2.7 Causalidad acumulativa de los fenómenos de aglomeración y concentración industrial

Los apartados anteriores recogen los principios teóricos sobre los que podemos construir un modelo evolucionista de los fenómenos de aglomeración y concentración industrial. En todos ellos hemos visto una dimensión geográfica de compleja interdependencia, en la medida en que las actividades económicas de las empresas se ven condicionadas por factores geográficos que a su vez se ven influenciados por las empresas. En definitiva, la evolución de una industria se desarrolla simultáneamente en las dos dimensiones económica y geográfica dificultando, si no haciéndolo imposible, separar una de otra.

Nos parece importante construir con todos estos elementos teóricos una explicación coherente de los fenómenos de aglomeración industrial¹¹². La Figura 20 describe gráficamente el mecanismo o causalidad que desde un punto de vista evolucionista explica muchos de los fenómenos de aglomeración industrial.

¹¹¹ Audretsch y Feldman (1996) avalan esta afirmación al constatar como las actividades de innovación tienden a aglomerarse en la medida en que las economías basadas en el conocimiento son importantes en una industria. Igualmente el trabajo de Baptista y Swann (1998b) defiende este argumento al poner de manifiesto la mayor intensidad de la actividad innovadora en las aglomeraciones industriales de UK.

¹¹² No puede entenderse como una explicación universal porque la realidad de los fenómenos de aglomeración industrial es muy heterogénea y compleja, y son muchos los factores a tener en cuenta dependiendo de las características propias de cada industria. Sin embargo ofrece una posible explicación a aquellas industrias de marcado carácter tecnológico, donde la innovación y el conocimiento juegan un papel importante.

La causalidad se apoya en la siguiente suposición: la innovación constituye el motor de desarrollo económico y geográfico de la industria. La cadena causal se puede resumir de la siguiente forma:

- La innovación permite desarrollar mejoras en los procesos de producción (innovación de proceso) y mejoras en las características de los productos (innovación de producto), que ofrecen ventajas competitivas a la empresa.
- La innovación además hace posible la expansión de la empresa mediante la creación de nuevas variedades de productos (diferenciación de productos).
- El crecimiento de la empresa suele tener un efecto positivo en la innovación en forma de economías de escala que afectan a las actividades de I+D+i.
- El crecimiento de la empresa conlleva consecuentemente el crecimiento de la región donde está localizada, y este desarrollo económico y regional potencia las externalidades de conocimiento.
- La proximidad geográfica entre las empresas de una misma región favorece las externalidades de conocimiento (*knowledge spillovers*) que influyen en los procesos de innovación y además pueden reforzar positivamente el desarrollo de nuevas variedades conforme aumenta la diversidad de empresas y productos en la región (recombinación).

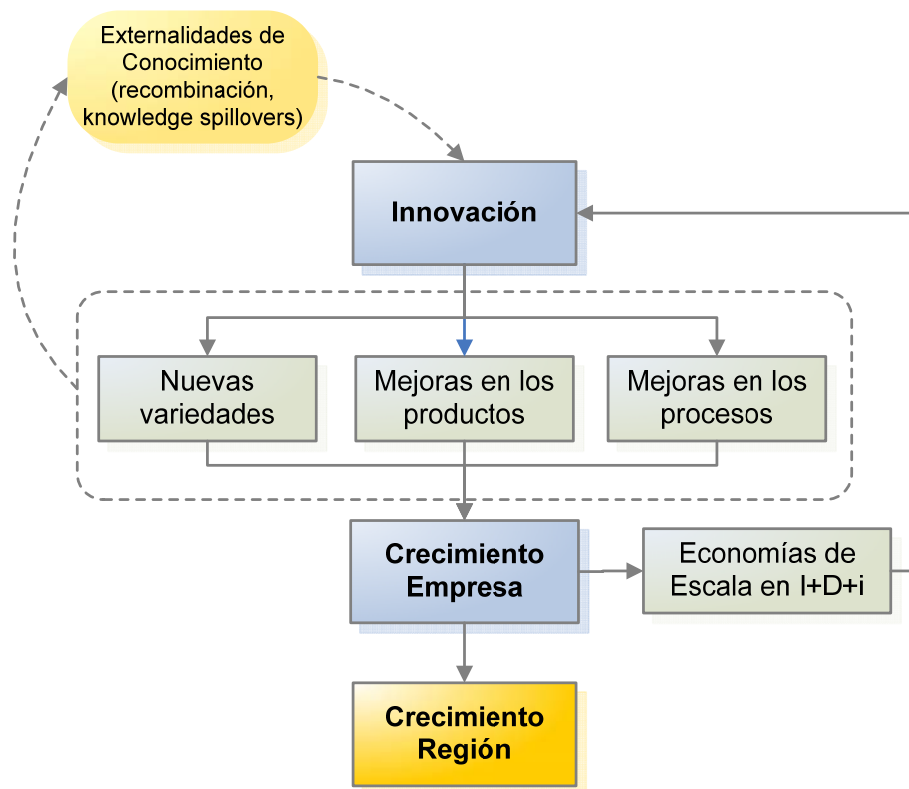


Figura 20. Causalidad acumulativa de un modelo de Geografía Económica Evolucionista que explica los fenómenos de concentración industrial y espacial (elaboración propia a partir de la propuesta de Frenkel y Boschma (2007)).

Podemos destacar la gran diferencia entre esta argumentación evolucionista y la explicación que Fujita, Krugman y Venables (1999) ofrecen con su alternativa analítica, fundamentada principalmente en el efecto del tamaño del mercado local y la relación entre las economías de escala de las empresas y los costes de transporte.

4.3 Descripción del modelo propuesto

El objetivo de nuestro modelo evolucionista de dinámica industrial es explicar los fenómenos de aglomeración industrial como resultado del comportamiento individual de las empresas que entran, crecen y salen de una industria. La evolución de la industria se caracteriza por un incremento paulatino en el número de variedades presentes en la industria, y consecuentemente por un aumento de la presión de selección del mercado entre los productos.

El presente modelo constituye un esfuerzo por formalizar, utilizando el modelado basado en agentes, los principios teóricos explicados anteriormente. Como en

toda modelización, conlleva un ejercicio de concreción y desarrollo de las suposiciones generales al conjunto de procedimientos que describen el modelo computacional.

4.3.1 Suposiciones básicas del modelo

Nuestro modelo de dinámica industrial describe la evolución espacio-temporal de una industria en la que un conjunto de empresas fabrican, a partir de sus divisiones de producción, los diferentes productos que conforman la industria.

Al igual que muchos modelos evolucionistas (Nelson & Winter, 1982; Andersen, 1994; Kwasnicki, 1996), consideramos las siguientes *suposiciones generales*:

- Los agentes (empresas) no disponen de información perfecta y toman sus decisiones de forma local (teniendo en cuenta la información de la que disponen, sus capacidades y objetivos propios).
- El comportamiento y la toma de decisiones de los agentes se puede describir mediante sencillas reglas o rutinas.
- Cada empresa pueden aprender por sí misma o imitar el comportamiento de otras.
- Los procesos de innovación dependen en gran medida de la evolución (dependencia histórica) y experiencia propia de cada empresa.
- Las interacciones entre todos los agentes se producen en situaciones de desequilibrio (empresas que producen por debajo/encima de su capacidad óptima, empresas que utilizan tecnologías menos eficientes que sus competidores, preferencias de los consumidores que cambian con el tiempo, etc.).
- La industria evoluciona como consecuencia de los cambios endógenos y exógenos en los agentes (empresas y consumidores), principalmente de naturaleza estocástica, y puede describirse como un proceso de Markov (ver Figura 21).
- El punto de vista de nuestro análisis se centra en el estudio de la dinámica económica y geográfica de la industria, y no en el análisis de posibles estados de equilibrio.

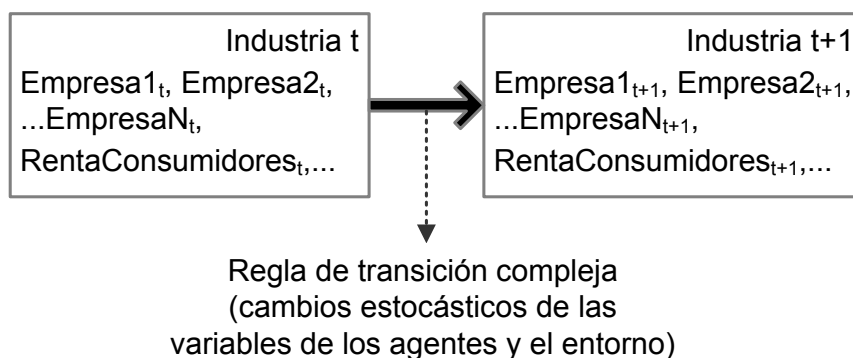


Figura 21. Dinámica de la industria como proceso de Markov.

Puesto que queremos definir un modelo de aglomeración y concentración industrial, además tendremos en cuenta las siguientes *suposiciones particulares*:

- Inicialmente la industria está compuesta por un conjunto de empresas igualmente repartidas entre diferentes localizaciones (que de ahora en adelante denominaremos simplemente regiones).
- La selección se describe mediante un mercado de *competencia monopolística*, donde los consumidores se representan mediante una función de utilidad agregada con elasticidad de sustitución constante entre variedades¹¹³.
- La renta que los consumidores dedican a los productos de la industria evoluciona de forma exógena siguiendo una *curva logística*, característica del ciclo de vida de la industria.
- Una empresa está formada por una o más divisiones productivas que fabrican una determinada variedad de producto.
- Cada variedad de producto es fabricada por una única empresa¹¹⁴, en su correspondiente división, y cada empresa puede fabricar diferentes variedades.

La Figura 22 resume gráficamente las principales características de nuestro modelo en relación con los tres descriptores básicos de todo modelo evolucionista: diversidad, selección y desarrollo. Los dos elementos principales que identifican nuestro

¹¹³ Semejante al modelo de Dixit-Stiglitz utilizado por la Nueva Geografía Económica, descrito en el capítulo 2.

¹¹⁴ El modelo de competencia monopolística nos permite que cada empresa fabrique un producto *imperfectamente* diferenciado por los consumidores, luego no existe la posibilidad de que una empresa imite perfectamente el producto de otra.

modelo son la innovación y la competencia monopolística, por lo que lo llamaremos *modelo evolucionista de una industria innovadora y diferenciada*.

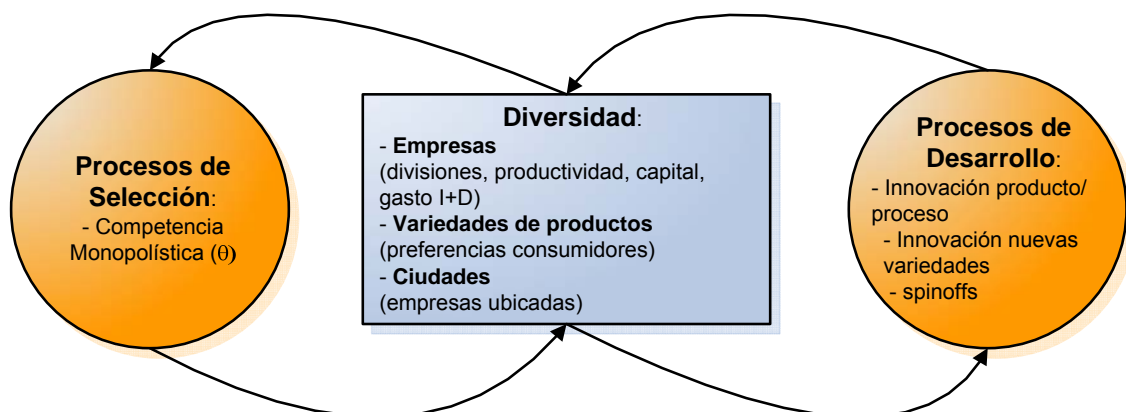


Figura 22. Principales características de nuestro modelo evolucionista de una industria innovadora y diferenciada, descritas dentro del marco de análisis evolucionista.

En los siguientes apartados haremos una descripción detallada de todos los elementos que conforman nuestro modelo evolucionista: el mercado de competencia monopolística, el ciclo de vida de la industria, la innovación y knowledge spillovers, y la entrada y salida de empresas en la industria.

4.3.2 El mercado de competencia monopolística

Vamos a extender la aproximación de competencia monopolística originalmente propuesta por Dixit-Stiglitz (1977) para modelar el mercado y el comportamiento de los consumidores. Los procesos de selección en la industria se desarrollan a través de la competencia entre productos cuasi-sustitutivos, donde cada variedad de producto es monopolio de una única empresa. El poder de monopolio está condicionado por el hecho de que los consumidores distinguen imperfectamente entre las diferentes variedades.

El comportamiento de los consumidores se describe a partir de una *utilidad agregada*, definida mediante una función de elasticidad de sustitución constante de todas las variedades de productos:

$$U = \left(\sum_{k=1}^m (f_k(t)q_k(t))^\theta \right)^{1/\theta} = \left(\sum_{k=1}^m (f_k(t)q_k(t))^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad 0 < \theta < 1 \quad (4.1)$$

Las variables $f_k(t)$ representan la preferencia de los consumidores por la variedad k-ésima¹¹⁵. Esta preferencia recoge todas aquellas características del producto que el consumidor aprecia y valora, y que la empresa puede mejorar mediante las correspondientes innovaciones de producto como veremos posteriormente.

El parámetro θ gobierna el grado de preferencia por la variedad en todos los productos (y también la elasticidad de sustitución σ entre ellos): cuando $\theta \rightarrow 1$ tenemos productos *cuasi-sustitutos perfectos*, mientras que al decrecer el valor de θ aumenta la diferenciación que perciben los consumidores y su deseo por consumir una mayor variedad de productos.

La elección del consumidor se describe como un problema de maximización de la función de utilidad anterior, conocida la renta $Y(t)$ que destinan a los productos de la industria. El cálculo de los precios de cada variedad se calcula haciendo una suposición de que en cada iteración el mercado se vacía (*market clearing*)¹¹⁶:

$$p_j(t) = \frac{f_j(t)^\theta}{q_j(t)^{1-\theta} \sum_{k=1}^m (f_k(t)q_k(t))^\theta} Y(t) \quad (4.2)$$

La expresión anterior nos describe en definitiva la función de demanda de cada variedad de producto. Podemos observar como el precio de una variedad crece con la renta $Y(t)$ y con la preferencia de los consumidores $f_k(t)$ en un grado que depende del parámetro θ .

4.3.3 El ciclo de vida de la industria

La demanda de productos depende de la renta que los consumidores destinan a la industria. Supondremos que esta renta evoluciona de forma exógena siguiendo una

¹¹⁵ Mediante la incorporación de este parámetro conseguimos introducir heterogeneidad en la preferencias de los consumidores por cada una de las variedades de producto.

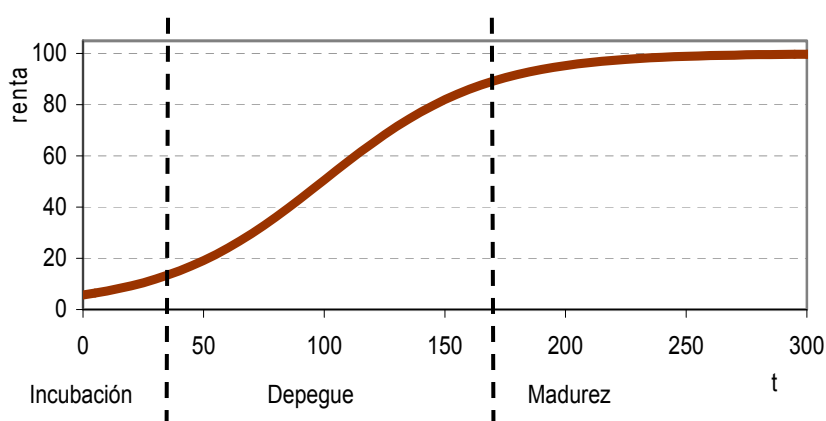
¹¹⁶ La expresión de los precios se puede obtener fácilmente resolviendo el problema de maximización de la utilidad de los consumidores, sujeta a la restricción presupuestaria, conocidas todas las cantidades de las variedades de productos.

ecuación logística, Ec.(4.3), que utilizaremos para caracterizar el ciclo de vida de la industria¹¹⁷.

$$Y(t) = Y_{ini} + \frac{Y_{max} - Y_{ini}}{1 + a \exp(-bt)} \quad (4.3)$$

Habitualmente se viene representando el ciclo de vida de una industria mediante una curva en forma de S, aprovechando la teorías semejantes sobre el ciclo de vida del producto (Klepper, 1997). La vida de una industria suele pasar por tres diferentes estadios: una etapa de incubación, donde un pequeño grupo de empresas disfrutan de un importante poder de monopolio; una etapa de despegue o desarrollo, durante la que se incorporan un mayor número de empresas, a la vez que también salen empresas de la industria; y por último una etapa de estabilización o madurez.

Resulta evidente que la renta que los consumidores dedican a comprar productos de la industria tiene que seguir una evolución semejante. En nuestro modelo supondremos que esta variable que determina la demanda es exógena, mientras que las empresas seguirán una dinámica endógena de acuerdo a los procesos de innovación de variedades, los spin-offs y la entrada de nuevas empresas que describimos en los siguientes apartados. La Figura 23 representa la curva logística de la renta, semejante a la que utilizaremos en las simulaciones del modelo.



¹¹⁷ En algunos procedimientos del modelo se utiliza un *indicador de madurez* de la industria calculado como $Y(t)/Y_{max} \in (0,1)$.

Figura 23. Evolución de la renta en la industria para la curva logística de parámetros $\{Y_{ini} = 1, Y_{max} = 100, a = 20, b = 0,03\}$ utilizada en las simulaciones del modelo.

4.3.4 El comportamiento de la empresa

La empresa y sus divisiones productivas

La unidad evolutiva principal de nuestro modelo es la empresa. Una empresa está constituida por una o más divisiones productivas, cada una de las cuales es responsable de la fabricación de una variedad de producto de la industria. Cada división j , perteneciente a la empresa i , se caracteriza por un stock de capital $K_{ij}(t)$ ¹¹⁸ y una productividad $A_{ij}(t)$ ¹¹⁹ que le permiten fabricar una cantidad de producto de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q_{ij}(t) = A_{ij}(t)(K_{ij}(t) - k_{ij}) \quad (4.4)$$

La variable k_{ij} representa los costes fijos de la empresa i y la división j . Supondremos que cada empresa tiene unos costes fijos k_f que se reparten entre todas sus divisiones, y a su vez cada división tiene unos costes fijos k_d . Si la división j pertenece a una empresa i que posee m_i divisiones¹²⁰, los costes fijos se calculan mediante la Ec. (4.5), donde los parámetros k_f, k_d son idénticos para todas las empresas y divisiones de la industria¹²¹.

$$k_{ij} = k_d + \frac{k_f}{m_i} \quad (4.5)$$

¹¹⁸ Supondremos que todas las divisiones que aparecen en la industria nacen con un stock de capital inicial descrito por una distribución normal $K_{ij}(t_{ini}) = N(K_{ini}, \sigma_k)$.

¹¹⁹ Al igual que en los modelos de Nelson y Winter (1982) el conocimiento y las rutinas de una empresa no son variables explícitas en el modelo, únicamente se cuantifica su efecto en la productividad del capital, así como su influencia en los procesos aleatorios de innovación.

¹²⁰ Evidentemente el número de divisiones de cada empresa puede cambiar con el tiempo.

¹²¹ La utilización de esta aproximación sobre costes fijos en la empresa y divisiones supone exigir un stock de capital mínimo $K_{ij}(t) > k_d + k_f$ para poder operar en la industria. De esta forma podemos estudiar en el modelo diferentes escenarios variando la importancia de la inversión de capital inicial para establecerse en una industria.

El stock de capital de la empresa se calcula como suma de los stocks individuales de las divisiones:

$$K_i(t) = \sum_j^{m_i} K_{ij}(t) \quad (4.6)$$

Esfuerzo en I+D

El objetivo de toda empresa es crecer, para lo cual promueve que sus divisiones mejoren sus procesos productivos (innovación de proceso que se manifiesta en la productividad $A_{ij}(t)$), y las características del producto que aprecian los consumidores (innovación de producto que se manifiesta en las preferencias de cada variedad $f_j(t)$).

Con el mismo objetivo, la empresa trata además, de crear nuevas variedades de productos con las que poder adueñarse de un trozo del pastel de competencia monopolística que gobierna el mercado (innovación de nuevas variedades de producto).

La empresa fija la política de I+D mediante los ratios de gasto en innovación de proceso $r_i^{pc}(t)$ e innovación de producto $r_i^{pd}(t)$ de sus divisiones. De esta forma, cada división realiza un esfuerzo en innovación de proceso e innovación de producto:

$$\begin{aligned} K_{ij}^{pc}(t) &= r_i^{pc}(t) K_{ij}(t) \\ K_{ij}^{pd}(t) &= r_i^{pd}(t) K_{ij}(t) \end{aligned} \quad (4.7)$$

De manera análoga, la empresa fija en cada momento el ratio de gasto en innovación de nuevas variedades $r_i^{nv}(t)$, invirtiendo un esfuerzo en esta búsqueda de:

$$K_i^{nv}(t) = r_i^{nv}(t) K_i(t) = r_i^{nv}(t) \sum_{j=1}^{m_i} K_{ij}(t) \quad (4.8)$$

Mas adelante completaremos la descripción del proceso de innovación y cómo hemos modelado su naturaleza estocástica.

Beneficio y rendimiento

Conocido el precio de cada variedad, Ec.(4.2), las divisiones pueden calcular el beneficio total en cada periodo como:

$$\Pi_{ij}(t) = p_j Q_{ij}(t) - C_{ij}(t) = p_j A_{ij}(t)(K_{ij}(t) - k_{ij}) - c_{ij}(t)K_{ij}(t) \quad (4.9)$$

La variable $c_{ij}(t)$ representa el conjunto de costes de la división por unidad de capital, Ec.(4.10)¹²². El parámetro c cuantifica el coste del capital, que es idéntico para todas las divisiones de la industria.

$$c_{ij}(t) = c + r_{ij}^{pc}(t) + r_{ij}^{pd}(t) + r_i^{nv}(t) \quad (4.10)$$

El beneficio total de la empresa i se calcula fácilmente como suma de los beneficios de cada división:

$$\Pi_i(t) = \sum_j^{m_i} \Pi_{ij}(t) \quad (4.11)$$

Una vez calculados los beneficios totales, la empresa actualiza una variable de *rendimiento* $x_{ij}(t)$ que recoge la evolución de los beneficios pasados (por unidad de capital) de acuerdo con la Ec.(4.12), para lo que tiene en cuenta un parámetro de memoria ϕ_x . Como veremos próximamente, esta magnitud de administración de la empresa será utilizada en la regla de adaptación de la política de I+D.

$$x_{ij}(t+1) = \phi_x x_{ij}(t) + (1 - \phi_x) \frac{\Pi_{ij}(t)}{K_{ij}(t)} \quad (4.12)$$

Inversión de capital para cada periodo

En cada periodo la empresa conoce los beneficios obtenidos por sus divisiones, Ec.(4.9), y ha de calcular la inversión en stock de capital que quiere realizar para el siguiente ejercicio en cada una de ellas. Utilizaremos una regla de inversión sencilla, semejante a la empleada en la familia de modelos evolucionistas de Nelson y Winter (1982), aunque adaptada al mercado de competencia monopolística de nuestra industria.

Supondremos que el stock de capital de una división no se pierde aunque ésta tenga pérdidas, únicamente se devalúa con el paso del tiempo de acuerdo a un

¹²² En ocasiones utilizaremos los beneficios de la división por unidad de capital $\pi_{ij}(t) = \frac{\Pi_{ij}(t)}{K_{ij}(t)}$.

parámetro de *depreciación del capital* δ . Cada división actualiza su capital siguiendo la ecuación:

$$K_{ij}(t+1) = K_{ij}(t)(1 - \delta + I_{ij}(t)) \quad (4.13)$$

La magnitud $I_{ij}(t)$ representa el ratio de inversión (por unidad de capital) para el siguiente ejercicio. En el cálculo de $I_{ij}(t)$ la empresa tiene en cuenta la inversión máxima $I_{ij}^{\max}(t)$ que *puede* realizar y la inversión deseada $I_{ij}^{des}(t)$ que *quisiera* realizar:

$$I_{ij}(t) = \max\left(0, \min\left(I_{ij}^{\max}(t), I_{ij}^{des}(t)\right)\right) \quad (4.14)$$

La *inversión máxima* depende de los beneficios obtenidos en el periodo, Ec.(4.15). En el caso de que la división obtenga beneficios, disfrutará de una financiación positiva externa que determina el parámetro b_f .

$$I_{ij}^{\max}(t) = \begin{cases} \delta + (1 + b_f)\pi_{ij}(t) & \text{si } \pi_{ij}(t) > 0 \\ \delta + \pi_{ij}(t) & \text{si } \pi_{ij}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

Para calcular la inversión deseada supondremos que la empresa sigue una sencilla regla de maximización del beneficio. Puesto que cada división disfruta de una situación de cuasi-monopolio, ésta puede mirar a su curva individual de demanda y maximizar beneficios haciendo que en los ingresos marginales sean igual a los costes marginales.

Aquí hacemos la siguiente suposición: para una industria con un número de variedades de producto suficientemente grande, la decisión individual de cada división no afecta significativamente a las curvas de demanda individuales. Bajo esta suposición la Ec.(4.2) puede reescribirse como:

$$q_j(t) = \Phi p_j(t)^{-\sigma} \quad \text{con } \sigma = \frac{1}{1-\theta} > 1 \quad (4.16)$$

Siendo Φ una constante que agrupa el resto de variables de la demanda que desde el punto de vista de la empresa son tomadas como constantes. La Ec.(1.7) representa la curva de demanda de la variedad j -ésima, de elasticidad conocida e igual a

la elasticidad de sustitución σ . La inversión deseada dependerá de cuánto estemos alejados de la situación óptima en la que los ingresos marginales son iguales a los costes marginales. Esta desviación se puede expresar en función de los *márgenes* de la siguiente forma:

$$I_{ij}^{des}(t) = 1 + \delta - \frac{mg^{des}}{mg^{exp}(t)} \quad (4.17)$$

donde se tiene en cuenta la relación entre el margen deseado mg^{des} , que depende de la elasticidad de la curva de demanda σ , y el margen esperado $mg^{exp}(t)$, que depende del precio esperado de la variedad y los costes marginales de la división:

$$mg^{des} = \left(\frac{\sigma}{\sigma - 1} \right) = \frac{1}{\theta} \quad (4.18)$$

$$mg^{exp}(t) = \frac{p_j(t)}{cm_{ij}(t)} = \frac{p_j(t)A_{ij}(t)}{c_{ij}(t)} \quad (4.19)$$

Podemos observar que el margen deseado es constante e igual a todas las divisiones de la industria. Sin embargo, no ocurre lo mismo con el margen esperado que depende de la productividad de cada división, así como de los gastos por unidad de capital que recogen fundamentalmente los gastos en I+D. Además hay que tener en cuenta que el esfuerzo en I+D tienen un efecto positivo, de naturaleza aleatoria, en la productividad y la preferencia del producto.

En el caso en el que la división disfrute de márgenes esperados superiores al margen deseado se aumentará el stock de capital y consecuentemente la cantidad a producir en el siguiente periodo¹²³. La nueva inversión de capital estará siempre limitada por los beneficios obtenidos en el anterior periodo.

4.3.5 Innovación y Knowledge Spillovers

En este apartado se describe uno de los elementos claves de nuestro modelo evolucionista. En la Figura 25 representamos gráficamente la causalidad que, a nuestro

¹²³ En la práctica esta regla es aproximada en tanto que el parámetro Φ de la curva de demanda, Ec.(1.7), no es constante y depende de las decisiones de la propia división.

juicio, explica los fenómenos de aglomeración y concentración industrial. Nuestro argumento principal es que la innovación constituye el motor de desarrollo económico y geográfico de la industria, en la medida en que va dotando a las empresas de ventajas competitivas (en forma de mejoras de proceso, mejoras de producto o desarrollo de nuevas variedades).

Suposiciones sobre los procesos de innovación

La innovación es un acontecimiento incierto, por lo que vamos a modelarlo como un proceso estocástico. No solo va a depender del esfuerzo individual en I+D que hace una empresa, sino también de las externalidades de conocimiento que pueden darse por el hecho de desarrollar la actividad en proximidad con otras empresas de la industria.

A la hora de definir el proceso de innovación, hemos tenido en cuenta las siguientes *suposiciones* para nuestro modelo:

- La probabilidad de innovar depende principalmente del esfuerzo individual que cada empresa o división realice en actividades de I+D. Además, existen rendimientos crecientes con el gasto en investigación.
- Sin embargo, pueden existir *knowledge spillovers* que influyen positivamente en la probabilidad de innovación que tiene una empresa, estando relacionados directamente con la actividad de I+D desarrollada en la región (Audretsch & Feldman, 1996).
- También pueden existir externalidades de conocimiento dentro de una empresa que influyen positivamente en la innovación, por ejemplo en forma de recombinación de conocimientos (Weitzman, 1998). A diferencia de los *knowledge spillovers*, que no son controlados por la organización, estas externalidades sí pueden ser favorecidas activamente por la misma (facilitando la transferencia de conocimiento entre las divisiones, ofreciendo espacios de intercambio de experiencias, creando grupos de investigación interdisciplinares, etc.).

- Los knowledge spillovers afectan por igual a todas las empresas de una región, mientras que las externalidades de conocimiento dentro de cada compañía sólo afectan a la misma y sus correspondientes divisiones productivas.
- La productividad del gasto en I+D decrece con el tiempo, conforme el ciclo de vida de la industria tiende a la madurez. Las productividades de los gastos en innovaciones de proceso y de producto son mayores que la correspondiente al gasto en innovaciones de nuevas variedades (parece evidente que crear una nueva variedad de producto resulta más difícil que desarrollar una mejora en los procesos productivos, o una nuevas característica en un producto¹²⁴).

En general la innovación en nuestro modelo se desarrolla mediante un proceso estocástico en dos etapas:

1. La división/empresa calcula su probabilidad de innovación y juega su oportunidad, como si de una lotería se tratase.
2. Si se tiene éxito, entonces evalúa el alcance de esta innovación.

La innovación como un proceso estocástico

Teniendo en cuenta las suposiciones anteriores, vamos a modelar la probabilidad de innovación mediante la Ec. (4.20)¹²⁵, que utilizaremos para las tres clases de innovación contempladas en el modelo.

$$P^{in} = P_{\max}^{in} - (P_{\max}^{in} - P_{\min}^{in}) \exp(-\alpha^{in} X^{in}) \quad (4.20)$$

El rango $(P_{\max}^{in} - P_{\min}^{in})$ representa el espacio de probabilidades de innovación. Este rango nos permite controlar las oportunidades de innovación que se presentan en la

¹²⁴ No solo ha de pensarse que el resultado de una innovación de producto es una nueva característica técnica del mismo, también puede ser un nuevo servicio, una nueva presentación, etc. que hace en definitiva mejorar la preferencia que los consumidores tienen por el producto.

¹²⁵ La familia de modelos evolucionistas utilizan una función de probabilidad más sencilla: $P^{in} = \text{Min}(\alpha X, 1)$, una recta de pendiente positiva que alcanza un máximo de 1. Sin embargo, nos ha parecido más interesante utilizar la función exponencial propuesta, que manteniendo la significación de las variables productividad α y esfuerzo en I+D X , nos permite gobernar el rango de las oportunidades $(P_{\min}^{in}, P_{\max}^{in})$, así como disponer de rendimientos variables con X debido a la característica no lineal de la función.

industria, así podemos modelar una industria donde resulta más sencillo conseguir éxitos en la innovación que en otra.

El parámetro α^{in} expresa la productividad del esfuerzo en innovación cuantificada por X^{in} . Evidentemente cuanto mayor sea la productividad, menores esfuerzos se requieren para disfrutar de las mismas probabilidades de innovación. Más adelante veremos que el esfuerzo en innovación dependerá del gasto en I+D y del efecto de las externalidades de conocimiento.

La Figura 24 muestra la curva de la función de probabilidad descrita, para diferentes valores del parámetro productividad de innovación α^{in} .

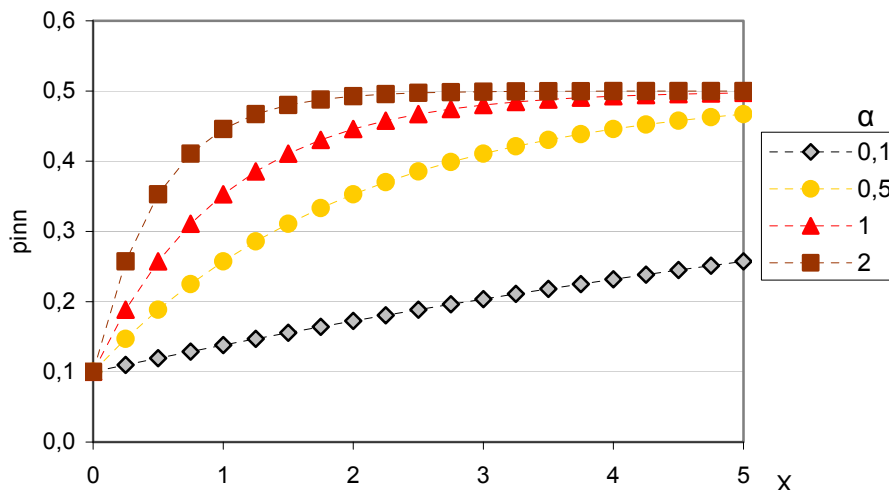


Figura 24. Función de probabilidad de innovación para diferentes valores del parámetro productividad de innovación α^{in} .

La naturaleza exponencial de la función hace que tengamos rendimientos variables del esfuerzo en innovación X^{in} según sea el valor de la productividad α^{in} .

Efecto de las externalidades de conocimiento

Vamos a definir el otro factor que determina la probabilidad de innovación y que hemos llamado esfuerzo en innovación X^{in} . Nosotros consideremos que este esfuerzo está condicionado (positivamente) por las externalidades de conocimiento a nivel de empresa y por los knowledge spillovers que se producen en la región. Con estas suposiciones hemos definido la siguiente función:

$$X^{in} = X_{individual}^{I+D} \left(X_{empresa}^{I+D} \right)^{\beta_{empresa}} \left(X_{región}^{I+D} \right)^{\beta_{región}} X_{escala}^{1+\beta_{empresa}+\beta_{región}}$$

$$0 < \beta_{región} < \beta_{empresa} \ll 1 \tag{4.21}$$

La Ec.(4.21) no es más que una función de Cobb-Douglas de rendimientos crecientes $1 + \beta_{empresa} + \beta_{región} > 1$, que utiliza como factores el esfuerzo (gasto) en I+D individual de la división $X_{individual}^{I+D}$, el esfuerzo en I+D de la empresa $X_{empresa}^{I+D}$ y el esfuerzo en I+D de la región $X_{región}^{I+D}$.

Los exponentes $\beta_{empresa}$ y $\beta_{región}$ gobiernan la importancia de las externalidades de conocimiento dentro de la empresa y los knowledge spillovers de la región respectivamente. Supondremos que los primeros son más importantes que los segundos, en la medida en que estas pueden ser controlables por la empresa, y que ambos en conjunto no condicionan en exceso la probabilidad de innovación, frente al gasto individual en I+D. Por cuestiones analíticas, añadimos además un factor de escala, constante e idéntico para toda la industria, que nos garantiza que los efectos anteriores son siempre mayores que 1.

Los gastos en I+D de cada división se calculan utilizando las Ec.(4.7) y (4.8). Los gastos a nivel de empresa y región serán las sumas de los gastos individuales de las unidades correspondientes.

Las Ec.(4.20) y (4.21) se utilizan en el cálculo de las probabilidades de las tres clases de innovación contempladas en el modelo: innovación de proceso, innovación de producto e innovación de nuevas variedades, aplicando las correspondientes magnitudes de gasto en I+D y productividad. En estas ecuaciones encontramos tres claros refuerzos de la innovación, consecuentes con las suposiciones formuladas al comienzo de este apartado:

- Economías de escala, cuanto mayor es una empresa (mayor número de divisiones productivas) mayores y más eficientes recursos puede emplear en I+D, Ec.(4.8), y consecuentemente mayores son sus probabilidades de innovar nuevas variedades que le permitirán seguir creciendo.

- A su vez, una división se beneficia de pertenecer a una empresa grande, pues disfruta de las externalidades de conocimiento que nacen de una mayor y diversa actividad en I+D de su propia empresa.
- Por último, las empresas y divisiones se benefician de los knowledge spillovers de la región donde están ubicadas, a los cuales contribuyen con su propia actividad de I+D.

Probabilidad decreciente de innovación de nuevas variedades

Una de las limitaciones de utilizar la aproximación de competencia monopolística de Dixit-Stiglitz es el conocido efecto *love-of-variety* que comentamos en el capítulo 1. La utilidad de los consumidores, definida en la Ec.(1.4), crece indefinidamente con el número de variedades que se introduzcan en el mercado. Sin embargo, aunque sea una reflexión intuitiva, el comportamiento real de los consumidores parece tener un cierto límite en cuanto a la variedad que están dispuestos a aceptar.

Intuitivamente también podemos observar que no resulta igualmente sencillo crear una nueva variedad de producto al comienzo de la vida de una industria que al final¹²⁶, cuando existe un cierto grado de agotamiento en el conocimiento necesario para hacerlo.

Por estas razones introduciremos una nueva suposición en cuanto al rango de oportunidades que se disfruta en la industria para innovar nuevas variedades. Supondremos que la probabilidad máxima $P_{\max}^{in}(t)$ decrece con el tiempo, conforme la industria va madurando, mediante la siguiente ecuación:

$$P_{\max}^{in}(t) = P_{\max}^{in}(t) \left(1 - \frac{Y(t)}{Y_{\max}} \right)^d \quad (4.22)$$

¹²⁶ No nos referimos a la innovación de producto que supone la incorporación de alguna nueva característica, sino a la creación de un nuevo producto diferente al resto, aunque en nuestra aproximación de competencia monopolística lo denominemos variedad de producto.

El exponente d gobierna el efecto del término de juventud de la industria $\left(1 - \frac{Y(t)}{Y_{\max}}\right)$. Para la probabilidad máxima $P_{\max}^{in}(t)$ sigue la función logística opuesta de la renta Y , Ec.(4.3).

Alcance de las innovaciones de proceso y de producto

Dentro de la empresa cada división productiva emplea parte de sus recursos en investigación, Ec.(4.7), para disfrutar de dos clases de innovaciones¹²⁷:

- *Innovación de proceso*: toda mejora en los procesos productivos de una división que permite mejorar la productividad del capital $A_{ij}(t)$.
- *Innovación de producto*: toda mejora en las características del producto que una división fabrica, que hace aumentar la preferencia $f_j(t)$ de los consumidores por él.

Cada tipo de innovación tiene un alcance diferente que modelaremos de la siguiente forma. Las innovaciones de proceso y de producto supondrán un *salto aleatorio* hacia delante sobre el estado actual de la división, de acuerdo con una distribución uniforme:

$$A_{ij}^{in}(t) = U\left(A_{ij}(t), (1 + \gamma^{pc})A_{ij}(t)\right) \quad (4.23)$$

$$f_j^{in}(t) = U\left(f_j(t), (1 + \gamma^{pd})f_j(t)\right) \quad (4.24)$$

Los parámetros γ^{pc} y γ^{pd} representan el ratio máximo de crecimiento que puede alcanzar una innovación, siendo iguales para todas las divisiones de la industria.

Vamos a introducir una restricción a estos parámetros para simplificar: supondremos que una innovación de proceso conlleva un incremento en la ventaja competitiva de la división del mismo orden de magnitud que una innovación de producto. Para ello utilizaremos la expresión del margen esperado, Ec.(4.19). Un salto

¹²⁷ Aunque los parámetros de gasto $r_i^{pc}(t)$ y $r_i^{pd}(t)$ que determina el esfuerzo correspondiente en I+D se deciden a nivel de empresa, y son los mismos para todas las divisiones de la empresa.

en la productividad de $(1 + \gamma^{pc})A_{ij}(t)$, suponiendo que la división adapta su capital para seguir produciendo la misma cantidad, conlleva un incremento en el margen de:

$$mg^{exp*} / mg^{exp} = (1 + \gamma^{pc}) \quad (4.25)$$

Un salto en la preferencia del producto de $(1 + \gamma^{pd})f_j(t)$ conlleva un aumento en el precio, Ec.(4.2). Suponiendo que existen un número significativo de variedades en el mercado, podemos estimar el correspondiente incremento en el margen de la siguiente forma:

$$mg^{exp*} / mg^{exp} = (1 + \gamma^{pd})^\theta \quad (4.26)$$

Para que los aumentos en el margen producidos por las dos clases de innovación sean semejante se debe cumplir entonces que¹²⁸:

$$(1 + \gamma^{pc}) = (1 + \gamma^{pd})^\theta \quad (4.27)$$

Innovación de nuevas variedades de producto: replicación e imitación

Una empresa puede innovar una *nueva variedad de producto*. Esta innovación es más radical que las anteriores que se producen a nivel de división por cuanto supone que la empresa introduce un nuevo producto en la industria, creando una nueva división que se encargará de su fabricación¹²⁹.

El proceso es semejante al descrito anteriormente. Primero, la empresa calcula su probabilidad de innovar y juega su baza en la lotería correspondiente. Después, si tiene éxito crea una nueva división que producirá la nueva variedad de producto. Los nuevos parámetros de esta división se calculan teniendo en cuenta un criterio evolucionista de *replicación*.

¹²⁸ En las simulaciones utilizaremos γ^{pc} como parámetro mientras que γ^{pd} se calculará teniendo en cuenta la relación propuesta.

¹²⁹ Como veremos la nueva variedad de producto se desarrolla en una nueva empresa emergente con probabilidad $p^{spinoff}$.

La nueva división nace en una empresa ya constituida, y por lo tanto tiene la posibilidad de replicar su conocimiento y sus rutinas. Esta herencia de conocimiento se concreta principalmente en los parámetros de productividad y preferencia. Vamos a modelar esta replicación mediante un sencillo proceso estocástico¹³⁰: los parámetros de una nueva división j^* se calculan a partir de una distribución uniforme, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$A_{j^*}(t) = U(\min(A_{ik}(t)), \max(A_{ik}(t))) \quad k \in i \quad (4.28)$$

$$f_{j^*}(t) = U(\min(f_k(t)), \max(f_k(t))) \quad k \in i \quad (4.29)$$

Vemos que cada productividad y preferencia de las divisiones y productos k que actualmente desarrolla la empresa i tiene la misma probabilidad de ser replicados por la nueva división j^* .

Spin-offs

Los spin-offs representan una fuente de diversidad en la dinámica de la industria. Cada vez que una empresa tiene éxito en la innovación de una variedad de producto, existe una probabilidad $p^{spinoff}$ de que sea desarrollada en una nueva empresa emergente. Este tipo de fenómenos de escisión están presentes en muchas industrias (Saxenian, 1994; Klepper, 2001).

Una empresa spin-off crea una primera división productiva cuyos parámetros de productividad y preferencia son una replicación de una de las divisiones de la empresa padre, Ec.(4.28) y Ec.(4.29). Además, como empresa, *imita* la política de I+D de la empresa padre copiando (con un cierto error) los parámetros de los ratios de gasto en I+D:

$$r_{spinoff}^Z = N(r_{padre}^Z, \sigma_e) \quad Z = pc, pd, nv \quad (4.30)$$

¹³⁰ Podríamos haber complicado más el proceso de replicación, pero puesto que el objetivo del modelo es estudiar principalmente los fenómenos de aglomeración y dinámica de la industria, no nos ha parecido oportuno hacerlo.

La nueva empresa emergente se ubicará en la misma región donde esté ya ubicada la empresa padre¹³¹.

Adaptación de la política de I+D

En el presente modelo utilizaremos dos escenarios de simulación:

- Los parámetros de gasto en I+D de cada empresa, $r_i^{pc}(t)$, $r_i^{pd}(t)$ y $r_i^{nv}(t)$, se mantienen constantes durante toda la simulación
- La empresa puede modificar estos parámetros en función de los resultados económicos que vaya obteniendo.

En el supuesto de que la empresa adapte su política de I+D, modifica los parámetros de gasto¹³² en dos etapas:

1. *Refuerzo* de la actual política. La empresa refuerza positivamente cada parámetro si la búsqueda en la clase de innovación correspondiente durante el periodo tuvo éxito, en caso contrario lo refuerza negativamente:

$$\begin{aligned} r_i^Z(t+1) &= (1 + \delta_{\text{refuerzo}}) r_i^Z(t) \text{ si éxito innovación } Z \text{ en } (t) \\ r_i^Z(t+1) &= (1 - \delta_{\text{refuerzo}}) r_i^Z(t) \text{ si fracaso innovación } Z \text{ en } (t) \\ Z &= pc, pd, nv \end{aligned} \quad (4.31)$$

2. *Imitación* de las políticas de la industria. La empresa compara su rendimiento con el rendimiento promedio en la industria. Si es mayor no hace ningún cambio, y si es menor modifica sus actuales parámetros en la dirección de la tendencia central de la industria:

$$\begin{aligned} r_i^Z(t+1) &= (1 + \phi_r) r_i^Z(t) + \phi_r \bar{r}_{\text{industria}}^Z(t) \text{ si } x_i(t) < \bar{x}_{\text{industria}}(t) \\ Z &= pc, pd, nv \end{aligned} \quad (4.32)$$

¹³¹ Esta suposición se hace teniendo en cuenta las evidencias empíricas sobre spin-offs (Klepper, 2001). Introduce en el modelo una cierta tendencia a la aglomeración espacial, en la medida en que aquellas regiones con empresas más innovadoras tendrán mayor probabilidad de acoger nuevas empresas emergentes.

¹³² Las ecuaciones se aplican a los diferentes tipos de parámetros correspondientes a la innovación de proceso, de producto y creación de nuevas variedades.

4.3.6 Entrada y salida de empresas

Entrada de empresas

En este modelo nuestra atención se centra especialmente en la dinámica interna de la industria, por la que las divisiones de las empresas existentes mejoran su posición competitiva a través de la innovación de proceso y de producto, y las empresas crean nuevas divisiones para fabricar nuevas variedades de producto o bien emergen empresas spin-offs.

Sin embargo, resulta necesario dotar de cierta variabilidad al modelo con la introducción de nuevas empresas en el mercado. Con el objeto de simplificar en lo posible el modelo, para facilitar la interpretación de los resultados de las simulaciones, supondremos un sencillo proceso de entrada. El número de nuevas empresas que entran en la industria en un periodo $n^{en}(t)$ sigue una *distribución de Poisson* de parámetro $\lambda_{entrada}$ constante durante toda la simulación:

$$n^{en}(t) = Poisson(\lambda_{entrada}) \quad \lambda_{entrada} = cte \quad (4.33)$$

A diferencia de las empresas spin-off, cada nueva entrada escogerá de forma aleatoria una de las posibles regiones para ubicarse.

La nueva empresa i^* entrante crea su división número 1 para producir la nueva variedad de producto j^* en la industria. Los parámetros de productividad y preferencia se calcularán teniendo en cuenta el conjunto de divisiones y productos de la industria:

$$A_{i^*1}(t) = U(\min(A_{ik}(t)), \max(A_{ik}(t))) \quad k, i \in industria \quad (4.34)$$

$$f_{j^*}(t) = U(\min(f_k(t)), \max(f_k(t))) \quad k \in industria \quad (4.35)$$

De igual forma, la nueva empresa entrante i^* imitará (con cierto grado de error) la política de I+D promedio de la industria:

$$r_{entrante}^Z = N(\bar{r}_{industria}^Z, \sigma_e) \quad Z = pc, pd, nv \quad (4.36)$$

Salida de empresas

La salida de empresas de la industria resulta todavía más sencilla de modelar. En la medida que son las divisiones las que desarrollan las actividades principales de fabricación de una variedad de producto única en la industria, tendremos en cuenta su rendimiento y su stock de capital para definir el siguiente criterio de salida:

$$\begin{aligned} x_{ij}(t) &< x_{\min} \\ K_{ij}(t) &< k_{\min} \quad \text{con } k_{\min} > k_d + k_f \end{aligned} \quad (4.37)$$

Si el rendimiento de una división cae por debajo de un valor mínimo x_{\min} o si su stock de capital se hace menor que un capital mínimo k_{\min} , la división termina su actividad y sale de la industria.

Consecuentemente, si todas las divisiones de una empresa quiebran la empresa también saldrá de la industria.

4.4 Relaciones y diferencias con otros modelos

El modelo evolucionista que hemos descrito en este capítulo formaliza, mediante el modelado basado en agentes, diferentes teorías sobre los fenómenos de aglomeración y concentración industrial comentadas en los capítulos anteriores. Una de las ventajas del modelado basado en agentes es que nos ofrece un punto de encuentro donde resulta posible, y deseable, la discusión de diferentes aproximaciones con el objetivo de encontrar lo mejor de cada una de ellas.

La Figura 25 resume gráficamente los principios teóricos, en forma de bloques conceptuales, que describen la aproximación de la Nueva Geografía Económica y la Geografía Economía Evolucionista a los fenómenos de aglomeración y concentración industrial. Todos ellos han sido descritos con detalle en los capítulos 1 y 2 de esta tesis. En medio hemos puesto nuestro modelo, poniendo de relieve las relaciones entre ambas disciplinas.

Dentro de la línea de investigación sobre Geografía Economía Evolucionista, donde se inscribe esta tesis, nuestro modelo puede verse como una extensión de la familia de modelos de dinámica industrial de Nelson y Winter (1982) en la que tratamos

de integrar la dimensión espacial de la evolución industrial. Si bien, a diferencia de ella, incorporamos la aproximación de competencia monopolística para modelar los procesos de selección en el mercado.

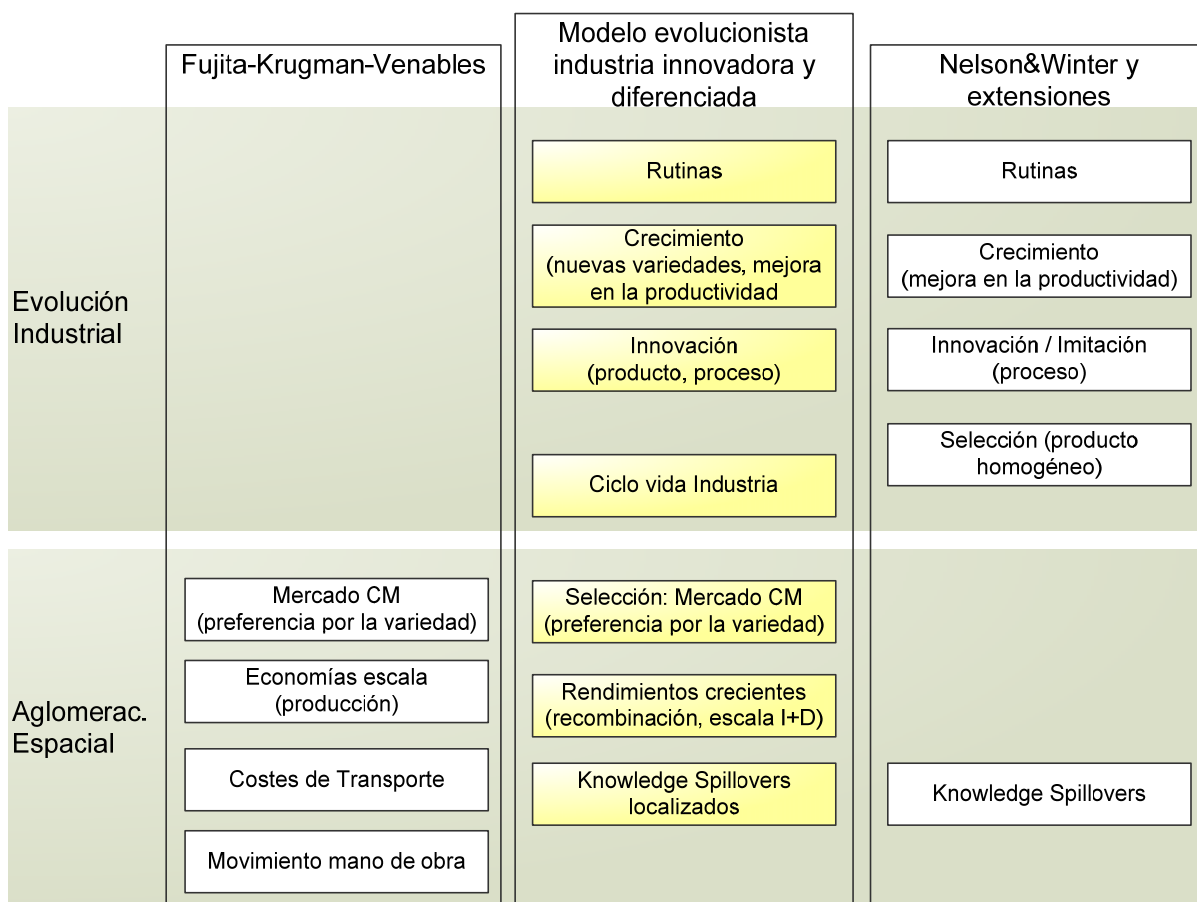


Figura 25. Síntesis de los principales fundamentos teóricos de los modelos de Nueva Geografía Económica, de Nelson y Winter y el modelo propuesto en esta tesis.

4.5 Discusión

En este capítulo hemos descrito nuestro modelo basado en agentes de una industria innovadora y diferenciada. La principal contribución del modelo es integrar en una sola propuesta formal una parte muy importante de la teoría evolucionista sobre dinámica industrial junto con otras aproximaciones a los fenómenos de aglomeración provenientes principalmente de la Geografía Económica.

De la Economía Evolucionista hemos heredado los principios de diversidad, desarrollo y selección, además de la formalización matemática y algorítmica. De la Geografía Económica hemos tomado las diferentes teorías sobre la innovación y los knowledge spillovers como fuente de aglomeración espacial. El modelado basado en agentes nos ha permitido hacer esta síntesis, que de otra forma hubiera sido imposible realizar.

Una de las tesis de nuestro trabajo es que la dimensión geográfica no solo es un factor contextual que condiciona los fenómenos económicos, sino que representa una dimensión más de la industria que evoluciona simultáneamente e interrelacionadamente con la dimensión económica. Esto dificulta enormemente el diseño de cualquier modelo económico-geográfico, que inevitablemente va a tender a prestar una mayor atención a una de las dimensiones en detrimento de la otra. En cierta medida nuestro modelo cae en esta simplificación, no exenta de error, pues centramos nuestra atención principalmente en la dimensión evolutiva de la dinámica económica de la industria; aunque para ser sinceros, de momento no hemos encontrado una forma mejor de hacerlo.

4.6 Anexo: descripción algorítmica del modelo

A continuación exponemos la descripción algorítmica que explica la dinámica del modelo (mediante diagramas UML de actividad).

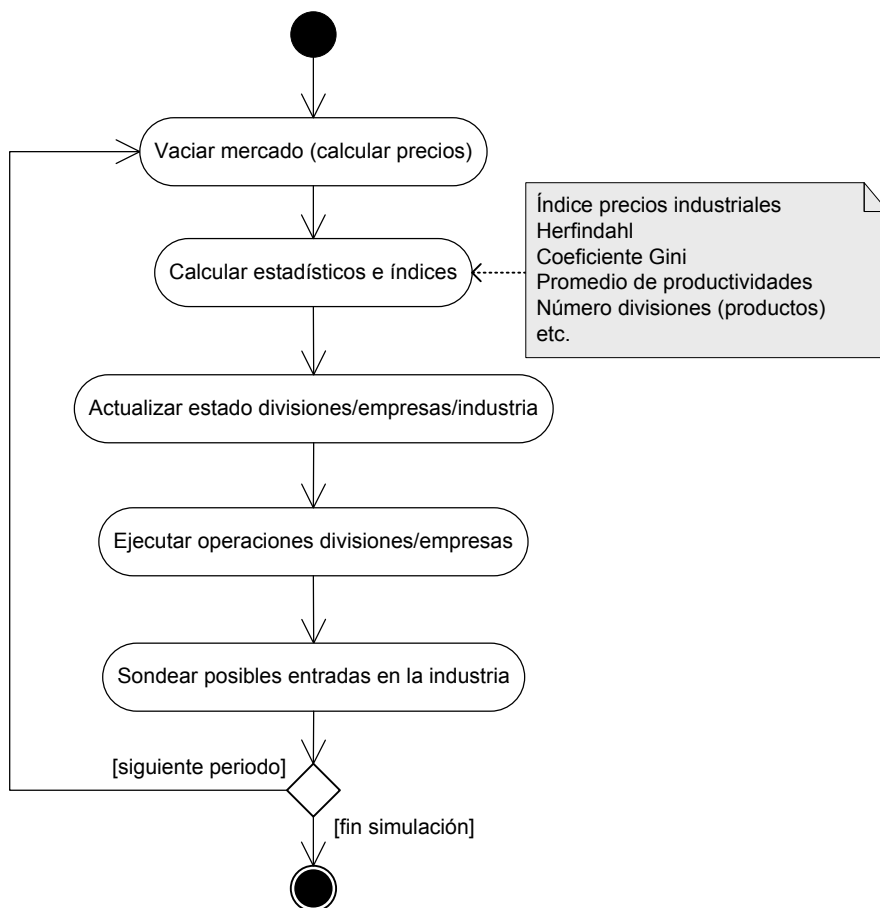


Figura 26. Diagrama UML de actividad que describe la secuencia de los procedimientos para cada periodo de la simulación.

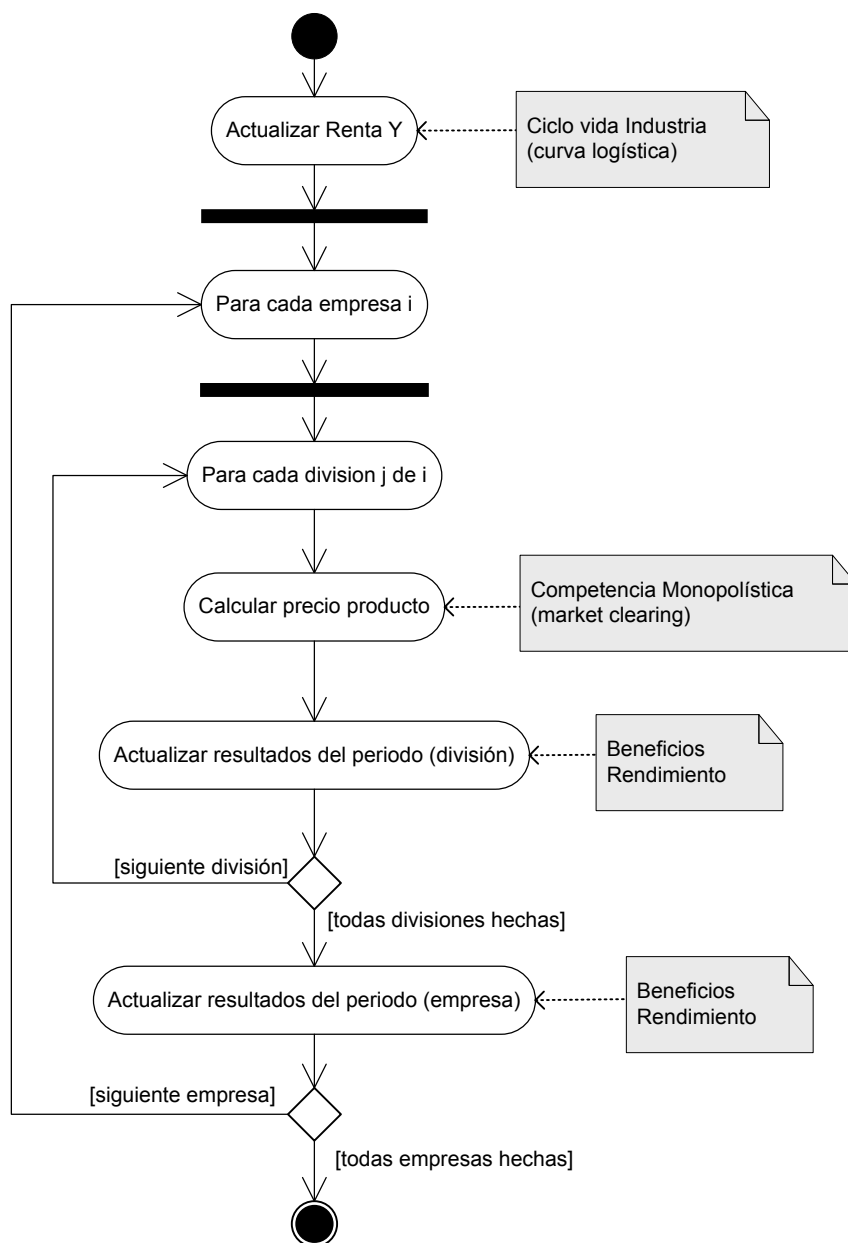


Figura 27. Diagrama UML de actividad que describe el procedimiento *vaciar mercado*.

Tras actualizar la renta (curva logística) se calculan los precios de todas las variedades de producto, y se actualizan los correspondientes beneficios y rendimientos de cada división y empresa.

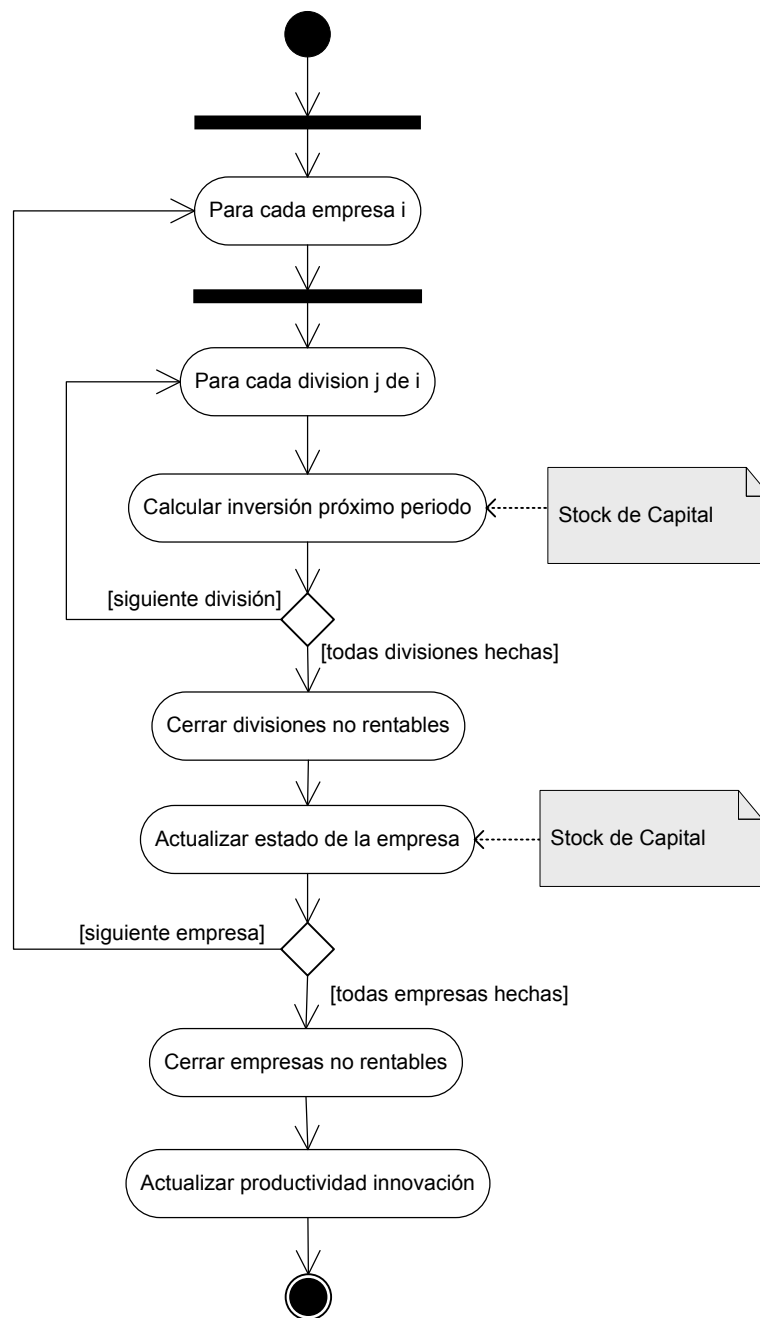


Figura 28. Diagrama de actividad UML que describe el procedimiento actualizar estado de la industria.

Cada división calcula la inversión deseada para el próximo periodo (teniendo en cuenta los beneficios, el margen actual y el margen deseado) y actualiza su stock de capital, se cierran aquellas divisiones y empresas que no son rentables (condiciones de salida de la industria).

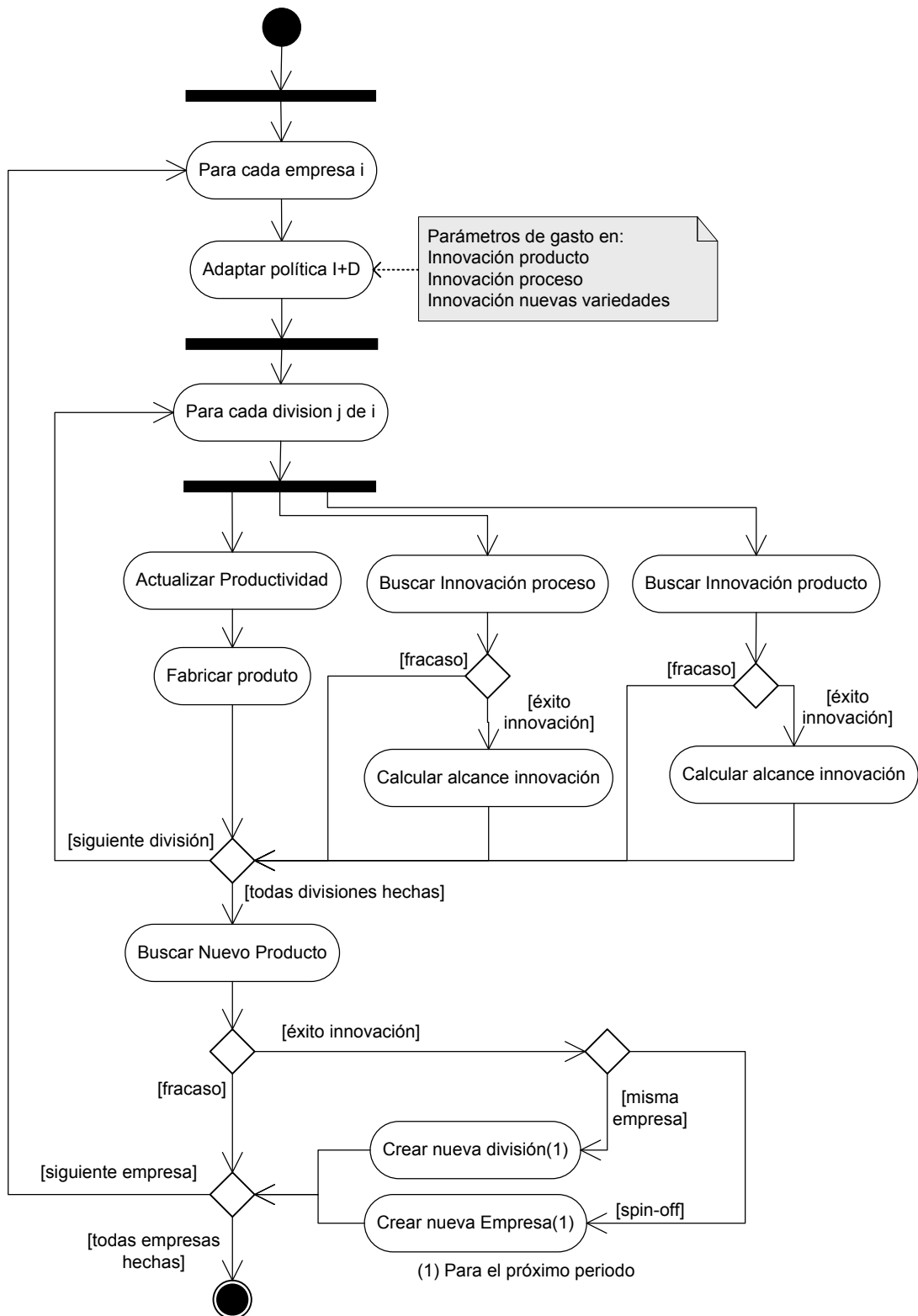


Figura 29. Diagrama de actividad UML que describe el procedimiento ejecutar operaciones.

Las divisiones producen la cantidad para el próximo periodo y buscan posibles innovaciones de proceso y de producto, las empresas actualizan su política de I+D y buscan posibles nuevas variedades a introducir en el mercado.

“All models are wrong. Some models are useful”

W. E. Deming (1900 - 1993)

Capítulo 5

Fenómenos de aglomeración y concentración industrial

En este capítulo analizamos mediante simulación computacional el modelo de industria innovadora y diferenciada propuesto. El objetivo de este modelo es tratar de dar una explicación a los fenómenos de aglomeración y concentración industrial desde una aproximación evolucionista, donde los procesos de innovación que constituyen el motor de cambio y crecimiento de empresas y regiones se ven influenciados por las características del mercado y los knowledge spillovers.

El capítulo se ha estructurado en cuatro apartados. En el primero explicamos todos los aspectos importantes en torno a la implementación y simulación de un modelo basado en agentes. Hablamos brevemente de REPAST (North *et al*, 2006), la plataforma de desarrollo y simulación de modelos basados en agentes que hemos utilizado en esta tesis, y definimos algunos términos importantes que nos permitirán comprender el diseño de experimentos y el alcance de los escenarios de simulación realizados.

En el segundo apartado describimos el conjunto de estadísticos que empleamos para caracterizar el estado y la dinámica de la industria en las dos dimensiones, económica y espacial, en las que evoluciona. Especialmente importantes son el índice de Herfindahl y el coeficiente de Gini que miden el grado de concentración industrial y aglomeración espacial, respectivamente. Posteriormente definimos los parámetros clave que permitirán organizar las simulaciones computacionales y planteamos un diseño de experimentos basado en diferentes escenarios de simulación.

En el tercer apartado explicamos los resultados más relevantes obtenidos en las simulaciones. Dedicamos un esfuerzo importante en comprender la dinámica evolutiva de la industria en el marco de competencia monopolística asumido en el modelo. Podemos adelantar que la concentración industrial depende significativamente del nivel de competitividad entre variedades de productos en el mercado.

El capítulo se concluye analizando con detalle la dimensión espacial de la industria a través de diferentes escenarios con 2 o más regiones. Al igual que ocurre con los fenómenos de concentración industrial, la aglomeración espacial de la industria se ve condicionada por el nivel de competitividad en el mercado.

5.1 Implementación del modelo y simulaciones

5.1.1 Herramienta de implementación y simulación del modelo: REPAST

En el capítulo 3 describimos la metodología del modelado basado en agentes: se comienza con la identificación y descripción de las entidades individuales o agentes que participan en el sistema de estudio, así como de sus relaciones e interacciones; después se implementa el diseño formal en un programa software; y finalmente se analiza el comportamiento del sistema y los fenómenos que emergen mediante simulación computacional.

La descripción formal del modelo ha sido expuesta en el capítulo anterior. Hemos implementado el modelo en REPAST ((North *et al.*, 2006)). REPAST, que responde al acrónimo de *REcursive Porous Agent Simulation Toolkit*, fue creado en la Universidad de Chicago por Sallach, Collier, Howe, North y otros (Collier *et al.*, 2003) como un conjunto de librerías de clases Java que funcionase conjuntamente con la estructura de simulación Swarm, otro importante paquete de librerías (Objective-C) para modelos basados en agentes.

Un modelo-software en REPAST es un programa OOP¹³³ formado por un conjunto de objetos: principalmente los agentes descritos por el modelo, y además el propio modelo de simulación que se encarga de inicializar y controlar toda la

¹³³ Object-Oriented Program.

simulación. En la práctica se comporta como un simulador de eventos discretos cuya unidad de tiempo se llama paso (*tick*).

La implementación de un modelo basado en agentes en REPAST se hace en las siguientes etapas:

1. La programación de todas las clases-agente (variables-estados y métodos-comportamientos) del sistema.
2. La programación del conjunto de métodos computacionales que serán utilizados para representar gráficamente aquellas variables del sistema que el modelador considere oportunas (estadísticos o datos individuales de los agentes), así como las salidas de datos en ficheros planos que serán utilizadas para un posterior análisis estadístico.
3. La programación de la secuencia (*scheduling*) de eventos que se suceden durante un paso de la simulación. Si identificamos el modelo de simulación con un proceso de Markov, en esta etapa se define la regla de transición de los estados.

Estas tres etapas coinciden con los métodos principales de la clase *SimModelImpl* responsable de la ejecución y control de una simulación. La Figura 3 describe el diagrama de las principales clases de nuestro modelo implementado en Repast. La implementación de un modelo de estas características no conlleva gran dificultad¹³⁴, a diferencia de la etapa de diseño del modelo donde, como modeladores, hemos empleado el mayor número de horas de investigación.

¹³⁴ Desde un punto de vista puramente informático.

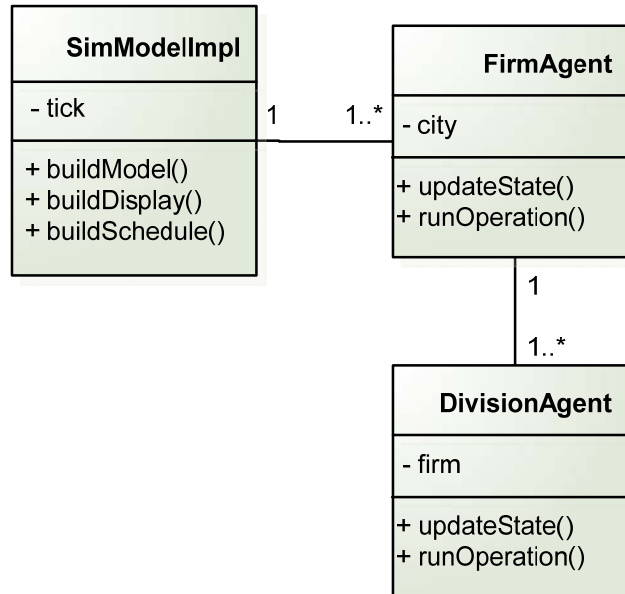


Figura 30. Diagrama de las principales clases del modelo de simulación implementado en Repast.

SimModelImpl responsable de ejecutar y gobernar cada simulación, *FirmAgent* que implementa a cada una de las empresas, y *DivisionAgent* que implementa a cada división productiva.

5.1.2 Análisis de un modelo de simulación basado en agentes

La principal ventaja de los modelos basados en agentes es que constituyen, en la práctica, un laboratorio computacional que nos permite obtener mediante simulación cuanta información y datos deseemos. Es responsabilidad nuestra, por tanto, hacer un adecuado diseño de experimentos que nos permita responder a las cuestiones principales de nuestro proyecto de investigación¹³⁵.

La principal característica del modelo evolucionista que proponemos es que describe un *proceso no ergódico (dependencia histórica)*: el estado final que alcanza el sistema depende de la secuencia de ocurrencias históricas (de naturaleza aleatoria) que suceden durante la simulación, aunque las condiciones iniciales puedan ser siempre iguales para todas las simulaciones. Esta naturaleza no determinista del sistema dificulta

¹³⁵ No obstante, esta etapa de análisis y validación de un modelo computacional se complica conforme tengamos un mayor número de parámetros principales. Frecuentemente resulta casi imposible hacer un análisis de sensibilidad completo del modelo, pues supondría realizar un número muy elevado de experimentos, por lo que las conclusiones que se infieren del mismo suelen estar condicionadas a un determinado rango de valores de los parámetros.

el análisis estadístico del mismo, aunque esto no significa que no podamos llegar a describir las propiedades estocásticas de cualquier estado del sistema.

Antes de proponer el diseño de experimentos para nuestro modelo, nos parece importante explicar algunos términos que nos permitirán después interpretar más fácilmente los resultados, así como la fuerza de las conclusiones que infiramos de ellos (ver Figura 31).

- Un *experimento* E_k corresponde a un conjunto específico de valores para los parámetros del modelo, que lo hacen único.
- Cada *ejecución* (simulación computacional completa del modelo) de un experimento nos proporciona una muestra de datos $S_j \in E_k$.
- Cada muestra recoge información de los diferentes *estados* por los que pasa el sistema, asociados unívocamente a un periodo de la secuencia temporal de la simulación. De esta forma, por ejemplo, el estado del sistema en t está descrito por los estados internos del conjunto de agentes A_i que lo integren en ese instante $\{X_{A_i S_j}^{E_k}(t)\}_{A_i=1\dots}$.
- Generalmente se calcula alguna clase de *estadístico* $Z_{S_j}^{E_k}(t)$ que mide una propiedad agregada del sistema en base a los estados individuales de los agentes.

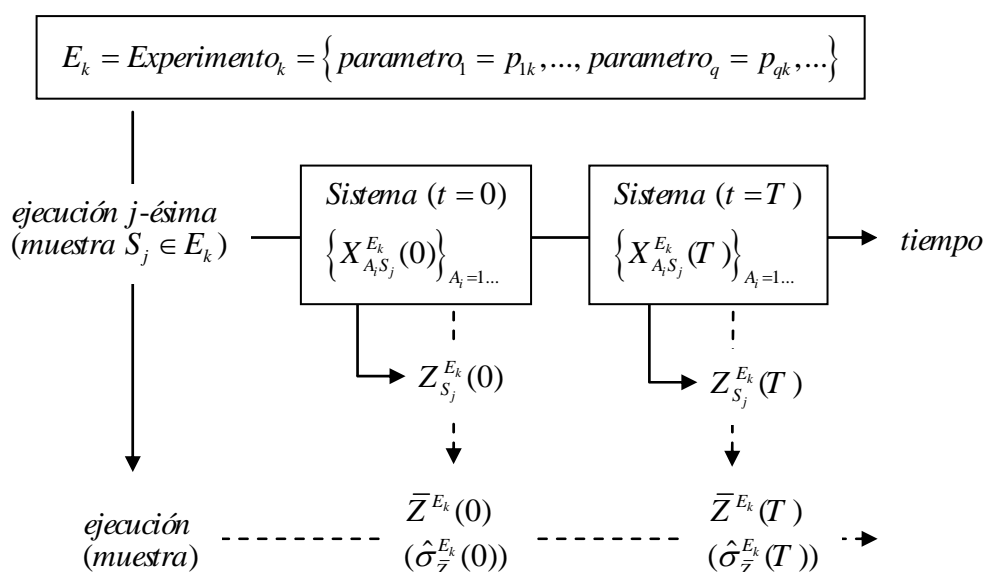


Figura 31. Relación entre un experimento, las ejecuciones y el estadístico para la simulación computacional de un modelo basado en agentes.

Una vez definido un experimento E_k y realizado un conjunto de ejecuciones¹³⁶ del mismo N_s , podemos hacer un análisis estadístico de los datos obtenidos. Para nuestro modelo emplearemos dos tipos de análisis, dependiendo si centramos nuestra atención en la evolución temporal o en el estudio de un estado particular del sistema.

Para hacer un estudio de la evolución temporal del sistema lo más sencillo es utilizar la *serie temporal de la media* del estadístico correspondiente $\bar{Z}^{E_k}(t)$, junto con su error estándar $\hat{\sigma}_{\bar{Z}}^{E_k}(t)$, obtenidos a partir del conjunto de muestras del experimento:

$$\left\{ \bar{Z}^{E_k}(t) = \frac{1}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} Z_{S_j}^{E_k}(t) \right\}_{t=0, \dots, T} \quad (5.1)$$

$$\left\{ \hat{\sigma}_{\bar{Z}}^{E_k}(t)^2 = \frac{1}{N_s(N_s - 1)} \sum_{j=1}^{N_s} \left(Z_{S_j}^{E_k}(t) - \bar{Z}^{E_k}(t) \right)^2 \right\}_{t=0, \dots, T} \quad (5.2)$$

Deberemos hacer un número de ejecuciones N_s suficiente para que el error estándar correspondiente $\hat{\sigma}_{\bar{Z}}^{E_k}(t)$ sea pequeño¹³⁷.

Sin embargo, sabemos que una simple medida de la tendencia central del estadístico $\bar{Z}^{E_k}(t)$ puede no aportar toda la información que necesitamos. Por ello, puede resultar interesante tratar de estimar la *función de distribución* del estadístico $f(Z^{E_k}(t))$ para algún estado particular del sistema. Por ejemplo, en los primeros periodos de la simulación, corto plazo, o al final de la misma, largo plazo:

$$\left\{ Z_{S_j}^{E_k}(T) \right\}_{S_j=1, \dots, N_s} \rightarrow \hat{f}(Z^{E_k}(T)) \quad (5.3)^{138}$$

¹³⁶ También llamadas replicaciones.

¹³⁷ Se han realizado un número suficiente de ejecuciones para que no sea necesario representar en las gráficas los intervalos de confianza. Aún así en cada figura que recoja una de estas series temporales del promedio de un estadístico particular se ha añadido como información el máximo coeficiente de variación del error estándar $\hat{\sigma}_{\bar{Z}}^{E_k}(t)/\bar{Z}^{E_k}(t)$ de la serie.

¹³⁸ Utilizaremos una estimación tipo núcleo (kernel) de la función de densidad (Bowman & Azzalini, 1997).

En un modelo basado en agentes como el nuestro no resulta posible mostrar datos individuales, en tanto que un agente pertenece al contexto de una única simulación y no se repetirá en otras simulaciones con idénticas propiedades. Sin embargo, en ocasiones puede ser interesante utilizar alguna *muestra representativa* para mostrar algún tipo de información individual. Es el caso, por ejemplo, de la distribución del tamaño de las empresas, para las que inevitablemente utilizaremos la información de una muestra particular¹³⁹.

5.2 Diseño de los experimentos

5.2.1 Estadísticos de concentración industrial y aglomeración espacial

El modelo propuesto define la dinámica económico-espacial de una industria, teniendo en cuenta la aproximación evolucionista a los fenómenos de aglomeración industrial que hemos planteado. Es importante no perder de vista estas dos dimensiones en las que la industria evoluciona simultáneamente.

Índice de Herfindahl

En la literatura científica sobre dinámica industrial es frecuente la utilización del *índice de Herfindahl* como medida de la concentración económica de la industria¹⁴⁰. Supuesto que en el periodo t la industria está constituida por $m_e(t)$ empresas, cada una de las cuales tiene una cuota de mercado $s_i(t)$, se define el índice como:

$$H(t) = \sum_{i=1}^{m_e(t)} s_i^2(t) \quad (5.4)$$

En nuestro modelo evolucionista cada empresa está formada por un conjunto de divisiones productivas que fabrican una variedad de producto. La cuota de mercado de la empresa i se obtiene como la suma de las cuotas correspondientes de sus divisiones

¹³⁹ Mostraremos más adelante como en nuestro modelo la distribución del tamaño de las empresas sigue una ley Zipf, semejante a las distribuciones reales (Axtell, 2001). Los parámetros concretos que definen cada distribución están limitados a una muestra particular, sin embargo el patrón general de la distribución, ley Zipf, se repite en todas ellas.

¹⁴⁰ Existen otros indicadores de concentración económica, si bien el índice de Herfindahl resulta sencillo de calcular y también de interpretar.

$j \in i$. Teniendo en cuenta el modelo de competencia monopolística de Dixit-Stiglitz, esta cuota se calcula como:

$$s_i(t) = \sum_{j \in i} s_j(t)$$

$$s_j(t) = \frac{(f_j(t)q_j(t))^\theta}{\sum_{k=1}^{m(t)} (f_k(t)q_k(t))^\theta} \quad (5.5)$$

Siendo $m(t)$ el número total de variedades de productos existentes en el mercado en el periodo t , que corresponde exactamente al número de divisiones productivas de la industria.

El índice de Herfindahl puede variar entre $\frac{1}{m(t)}$, que corresponde a una industria donde todas las empresas tienen el mismo peso en el mercado, y 1 cuando la industria está en manos de una única empresa (monopolio).

Frecuentemente se utiliza como indicador de concentración el recíproco de la cantidad anterior H^{-1} , por su fácil interpretación: número de empresas de idéntico tamaño que dan lugar al mismo valor de H y que puede compararse con el número existente de empresas en la industria $m(t)$.

Coefficiente de Gini

El índice de concentración industrial de Herfindahl no nos dice nada acerca del grado de aglomeración espacial de la industria. Por ello utilizaremos además el coeficiente de Gini, frecuentemente empleado en Geografía Económica, y que mide el grado de desigualdad en el reparto de una magnitud (generalmente la renta) entre diferentes grupos. En nuestro modelo lo emplearemos para medir la asimetría entre las diferentes regiones donde se encuentran ubicadas las empresas que forman la industria.

Como magnitud de medida utilizaremos las ventas totales, que se corresponden con la renta de los consumidores toda vez que siempre se cumple la restricción presupuestaria:

$$Y(t) = \sum_{j=1}^{m(t)} p_j(t)q_j(t) \tag{5.6}$$

Conocidas las ventas de cada empresa $v_i(t) = \sum_{j \in i} q_j(t)p_j(t)$, suma de las ventas de sus correspondientes divisiones productivas, la parte de la renta $Y(t)$ que toca a la región r se calcula como la suma de las ventas de las empresas allí localizadas:

$$y_r(t) = \sum_{i \in r} v_i(t) \tag{5.7}$$

Los datos anteriores ordenados de menor a mayor forman una serie creciente de N términos que llamamos y . Se construye otra serie también ascendente correspondiente al ranking de riqueza de las regiones r_y , que otorga a la región más pobre el puesto 1 y a las demás el valor correspondiente. El coeficiente de Gini se puede estimar de la siguiente forma (Yitzhaki, 1994):

$$G(t) = \frac{2\text{covar}(y, r_y)}{(N)\bar{y}} \tag{5.8}$$

Este indicador varía entre $(0,1)$ para un número N suficientemente grande, teniendo un valor más elevado cuanto mayor es la desigualdad entre las rentas de cada región.

Otros indicadores para estudiar la industria

Además de los índices de concentración económica y espacial anteriores, vamos a recoger otra información que nos ayudará a estudiar la evolución de la industria, y que resumimos en la Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5. Indicadores del proceso de innovación observados en las simulaciones.

Gasto I+D proceso	$\bar{K}^{pc}(t) = \frac{1}{m(t)} \sum_{j=1}^{m(t)} K_j^{pc}(t)$	(5.9)
Gasto I+D producto	$\bar{K}^{pd}(t) = \frac{1}{m(t)} \sum_{j=1}^{m(t)} K_j^{pd}(t)$	(5.10)

Gasto I+D nuevas variedades	$\bar{K}^{nv}(t) = \frac{1}{m_e(t)} \sum_{i=1}^{m_e(t)} K_i^{nv}(t)$	(5.11)
Número nuevas empresas	$m_{ne}(t)$	(5.12)
Número empresas salientes	$m_{es}(t)$	(5.13)

Tabla 6. Indicadores de la industria observados en las simulaciones.

Número de empresas	$m_e(t)$	(5.14)
Número de variedades (= divisiones)	$m(t)$	(5.15)
Utilidad de los consumidores	$U(t) = \left(\sum_{j=1}^{m(t)} (f_j(t)q_j(t))^\theta \right)^{1/\theta}$	(5.16)
Precio promedio ponderado	$\bar{P}(t) = \sum_{j=1}^{m(t)} s_j(t)p_j(t)$	(5.17)
Promedio capital de empresas	$\bar{K}_e(t) = \frac{1}{m_e(t)} \sum_{i=1}^{m_e(t)} K_i(t)$	(5.18)
Promedio capital de divisiones	$\bar{K}_d(t) = \frac{1}{m(t)} \sum_{j=1}^{m(t)} K_j(t)$	(5.19)
Promedio productividad	$\bar{A}(t) = \frac{1}{m(t)} \sum_{j=1}^{m(t)} A_j(t)$	(5.20)
Promedio preferencia producto	$\bar{f}(t) = \frac{1}{m(t)} \sum_{j=1}^{m(t)} f_j(t)$	(5.21)
Coefficiente determinación (distribución del tamaño de las empresas)	$R_{zipf}^2(t)$	(5.22)

5.2.2 Parámetros clave y escenarios de simulación

Parámetros de control

Con nuestro modelo evolucionista de dinámica industrial queremos explicar los fenómenos de aglomeración industrial como resultado del comportamiento individual de las empresas que entran, crecen y salen de una industria. Está construido sobre dos importantes *hipótesis*:

- Los procesos de selección en la industria se desarrollan a través de la competencia monopolística entre productos cuasi-sustitutos. El poder de

monopolio del que disfrutaban las empresas depende del grado de imperfección con el que los consumidores distinguen las diferentes variedades de productos. Como ya describimos en el anterior capítulo, esta característica está gobernada por el parámetro θ .

- Las empresas disfrutaban de knowledge spillovers que condicionan positivamente su actividad innovadora, en cuantía y efecto que depende de la región donde estén localizadas. El número de regiones será por tanto otro parámetro importante.

El parámetro principal de control del modelo es θ . La intensidad de la preferencia por la variedad de los consumidores es clave puesto que determina el *nivel de competitividad de la industria*. Cuando $\theta \rightarrow 1$ los bienes diferenciados son cuasi-sustitutos perfectos, siendo la presión de selección entre productos muy grande; al decrecer el valor de θ aumenta la diferenciación que perciben los consumidores y su deseo por consumir una mayor variedad de productos, por lo que la presión de selección se hace menor. Este termómetro de la selección de los mercados condicionará, como veremos, la evolución de la industria. La Tabla 7 sintetiza los diferentes significados de este parámetro de nuestro modelo.

Tabla 7. Significado del parámetro θ .

	$\theta \rightarrow 0$	→	$\theta \rightarrow 1$
Punto de vista de los Consumidores	Mayor deseo por consumir una variedad de productos	→	Menor deseo por consumir una variedad de productos
Punto de vista de la Selección	Bajo nivel de competitividad entre variedades de productos	→	Elevado nivel de competitividad entre variedades de productos
Variedades de productos	Elasticidad de sustitución $\sigma = 1$	→	Productos cuasi-sustitutos perfectos: elasticidad de sustitución $\sigma = \infty$

Escenarios de simulación

Mediante simulación computacional estudiaremos el grado de concentración económica y espacial al que evoluciona la industria, y también en qué medida depende del nivel de competitividad en el mercado. Además, nos interesará comprobar si el modelo es capaz de reproducir algunas regularidades (*stylized facts*) observadas en los fenómenos industriales reales. Esto nos dará una medida de la validez del modelo y consecuentemente de las hipótesis sobre las que hemos construido nuestra aproximación evolucionista a los fenómenos de aglomeración y concentración industrial.

Hemos planteado diferentes escenarios de simulación que se resumen en la Tabla 8. En todos ellos observaremos la evolución económica-espacial de la industria cuando variamos el parámetro θ .

Tabla 8. Escenarios de simulación propuestos.

Número de regiones	Nivel de preferencia por la variedad (nivel de competitividad en la industria)		
	Preferencia alta $\theta = 0,3$	Preferencia intermedia $\theta = 0,5$	Productos muy sustitutivos $\theta = 0,7$
Una región	Objetivo: analizar los fenómenos de concentración industrial		
Dos regiones	Objetivo: analizar los fenómenos de aglomeración espacial de la industria (estructura núcleo-periferia, múltiples regiones)		
Múltiples regiones			

Configuración básica de todas las simulaciones

Hemos propuesto un *set-up* básico¹⁴¹ para el resto de los parámetros del modelo, idéntico en todos los experimentos para poder hacer comparaciones de resultados entre los mismos. Los valores de cada parámetro han sido escogidos de forma arbitraria,

¹⁴¹ El apartado 5.7 resume la configuración básica de los parámetros del modelo.

aunque atendiendo a criterios de proporcionalidad al fenómeno económico que queremos modelar (industria, empresas, divisiones)¹⁴².

Las características comunes a todos los experimentos son las siguientes:

- Se han realizado *100 repeticiones* de cada experimento, suficientes para obtener un error estándar de todos los estadísticos de estudio inferior al 5%.
- La simulación comienza suponiendo que entra exactamente una nueva empresa en cada una de las regiones que se consideren en el experimento.
- Cada empresa inicial toma sus valores (capital, ratios de gasto en I+D, productividad, preferencia) siguiendo las reglas definidas en el capítulo anterior.
- La llegada de nuevas empresas a la industria sigue una distribución de Poisson idéntico en todos los escenarios para poder comparar los efectos de la dinámica endógena del sistema (creación de nuevas divisiones y spin-offs).
- Cada simulación consta de 300 periodos, aproximadamente el estado de madurez de la curva logística de la renta.

5.3 Fenómenos de concentración industrial

Vamos a comenzar nuestro estudio centrando nuestra atención en el análisis de la concentración industrial. Para ello utilizaremos los datos recogidos de un primer escenario de simulación (experimento) en el que la industria se encuentra ubicada en la misma región.

En principio, este caso de estudio es similar al formulado por muchos modelos evolucionistas de dinámica industrial (Nelson & Winter, 1982; Winter, 1984; Andersen, 1994; Kwasnicki, 1996). Si bien, a diferencia de ellos, nuestro modelo propone un escenario de selección de competencia monopolística más próximo a la realidad de los fenómenos económicos, donde el grado de preferencia por la variedad de productos de los consumidores es una variable muy importante.

¹⁴² En aquellos parámetros también presentes en otros modelos evolucionistas (como por ejemplo el coste de capital, la depreciación del capital, los ratios de gasto en I+D, etc.) hemos propuesto valores semejantes a los utilizados en dichos modelos (Nelson & Winter, 1982).

Podemos adelantar que la principal consecuencia que introduce la suposición de competencia monopolística es que resulta bastante difícil llegar a una situación pura de monopolio. Algo que sí ocurre en los modelos evolucionistas tradicionales, en los que es necesario *forzar* la dinámica de nuevas entradas en la industria para evitar la tendencia natural del mecanismo de selección al monopolio¹⁴³. En nuestro modelo la industria tiende a niveles de concentración empresarial que van a depender del grado de competitividad entre variedades de productos en el mercado.

5.3.1 Ciclo de vida de la industria como sincronizador de eventos

Nuestro modelo incorpora como variable exógena la renta que los consumidores destinan a los productos de la industria, mediante una función logística que varía con el tiempo. Puesto que los parámetros que definen esta función son los mismos para todas las simulaciones, la curva de la renta a la que se enfrentan las empresas en todos los escenarios es idéntica (ver Figura 32).

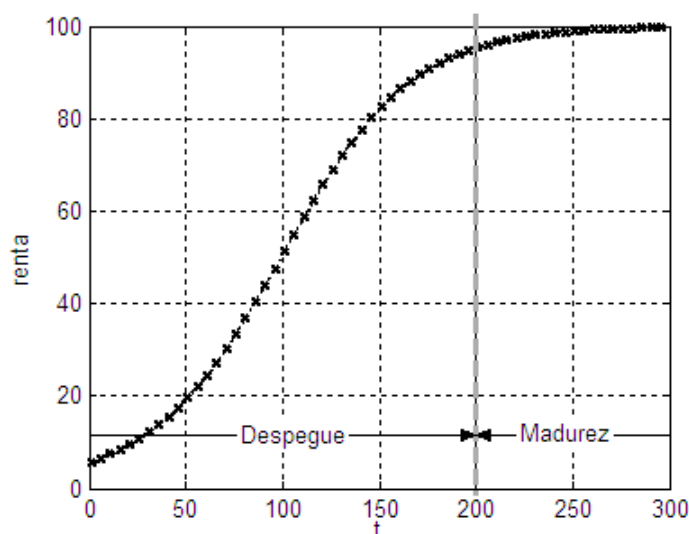


Figura 32. Curva logística de la evolución de la renta.

Idéntica para todos los escenarios de simulación propuestos. Utilizaremos el periodo $t = 300$ como el estado representativo de la industria en el largo plazo.

En la práctica esto significa que esta curva actúa como reloj fundamental de todas las simulaciones, en torno al cual se desarrollan el resto de los procesos contemplados en el modelo (innovación de proceso, de producto, creación de nuevas

¹⁴³ Esta tendencia al monopolio que exhiben muchos modelos evolucionistas de dinámica industrial ha sido comentada en los capítulos 2 y 4.

variedades, spin-offs, etc.). Así cuando hablemos del estado de la industria en el largo plazo, diremos que éste se alcanza aproximadamente en $t = 300$ cuando la renta ha consolidado su valor máximo.

En la literatura sobre el ciclo de vida de las industrias se suele hablar de tres estadios: incubación, despegue y madurez. Estas etapas responden a una descripción muy general de la vida de una industria y no existe una norma establecida que permita definir cuándo y cómo estamos en cada una de ellas. Por ello, y sin que esto suponga condicionar el análisis y las conclusiones que avanzamos en este capítulo, en las simulaciones hablaremos básicamente de dos etapas: una etapa de *despegue* $t \in (0, 200)$ en la que la renta crece rápidamente entre el 5% y el 95% de su valor máximo, y una etapa de *madurez* $t \in (200, 300)$ en la que la renta se aproxima lentamente a su máximo; y todo ello con el único objetivo de identificar dos fases diferentes de la evolución de la renta y de esta forma facilitar el análisis y comentario de los resultados.

5.3.2 Evolución del mercado de competencia monopolística

Utilidad, precio y número de variedades de productos

Para estudiar la evolución del mercado observaremos principalmente la serie temporal de la utilidad de los consumidores, Ec.(5.16), el precio promedio ponderado, Ec.(5.17), y el número de variedades de productos en el mercado, todas ellas representadas en la Figura 33, Figura 34 y Figura 35, respectivamente.

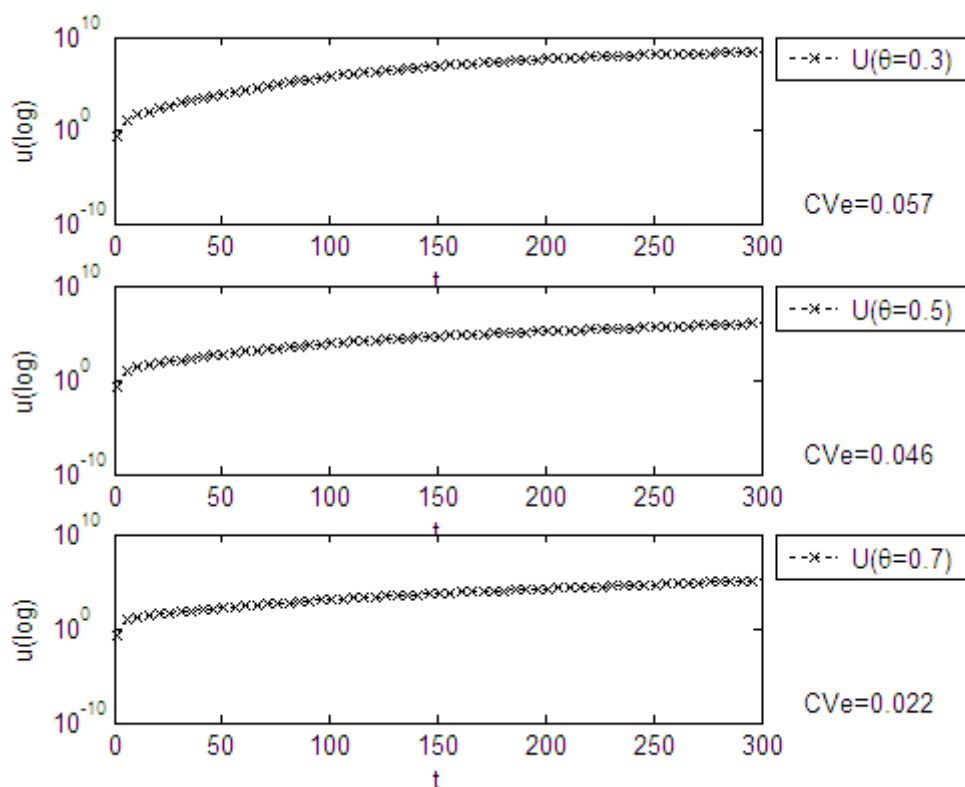


Figura 33. Evolución de la utilidad de los consumidores para diferentes valores de θ .

La interpretación de la *utilidad de los consumidores* resulta bastante trivial. Puesto que está definida por una función CES¹⁴⁴, la utilidad de los consumidores crece principalmente con el número de variedades de productos, además de por la cantidad de cada uno de ellos puesta en el mercado por las empresas. Ambas magnitudes dependen de las posibilidades de supervivencia de las empresas y sus divisiones productivas en el mercado. Por ello, la utilidad es mayor en mercados caracterizados por una reducida competitividad entre variedades ($\theta = 0,3$), que en mercados mucho más competitivos ($\theta = 0,7$). En los primeros resulta rentable fabricar un mayor número de variedades, con el consiguiente aumento de la satisfacción de los consumidores.

La evolución de los *precios*, Figura 34, también es consecuente con la explicación anterior. Recordemos que una simulación comienza siempre con la entrada de la primera empresa en la industria, que se localizará en la única región posible.

¹⁴⁴ Constant Elasticity of Substitution.

Posteriormente, la industria se desarrolla a partir de las nuevas divisiones que esta primera empresa crea, posibles spin-offs y la llegada aleatoria de nuevas entradas. Por esta razón, en los primeros periodos las divisiones de las pocas empresas existentes disfrutaban de elevados márgenes, que se corresponden con los altos precios de las variedades.

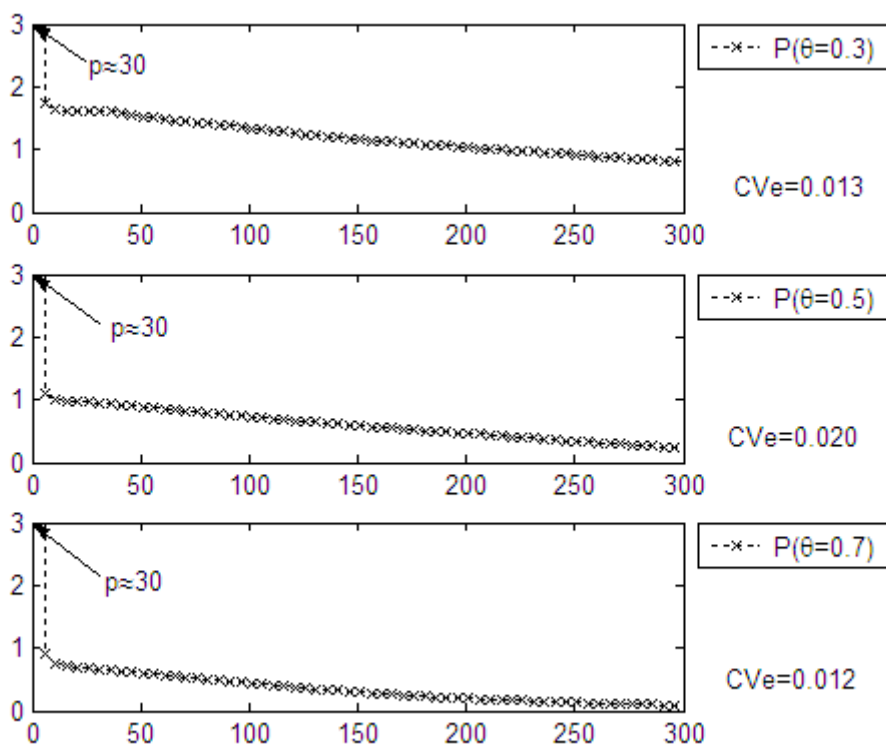


Figura 34. Evolución del precio promedio ponderado de las variedades para diferentes valores de θ .

Conforme la industria se desarrolla, los precios reflejan fielmente el grado de competitividad entre variedades de productos en el mercado. Cuando los consumidores muestran una gran preferencia por la variedad ($\theta = 0,3$), la competitividad entre empresas es pequeña y los precios de cada producto son relativamente más altos. Sin embargo, cuando la preferencia por la variedad es menor ($\theta = 0,7$), la mayor presión de la selección tira de los precios hacia abajo.

Bajo las hipótesis microeconómicas de competencia monopolística, precios bajos en la industria no tienen por qué estar relacionados con mayores cuotas de utilidad

en los consumidores. Debido al importante efecto *love-of-variety* que manifiestan los consumidores, la utilidad es significativamente más elevada siempre que exista una mayor oferta de variedades de productos, que como hemos comprobado coincide con mercados poco competitivos ($\theta = 0,3$) con un índice de precios más alto.

La Figura 35 muestra la evolución del número de variedades de productos en el mercado. Ya hemos comentado que en nuestro modelo el camino natural para que las empresas crezcan pasa principalmente por la innovación de nuevos productos. Consecuentemente, las tres gráficas muestran una tendencia creciente en el número de variedades, cantidad que depende en gran medida de la renta que los consumidores destinan a los productos de la industria y que crece siguiendo una curva logística.

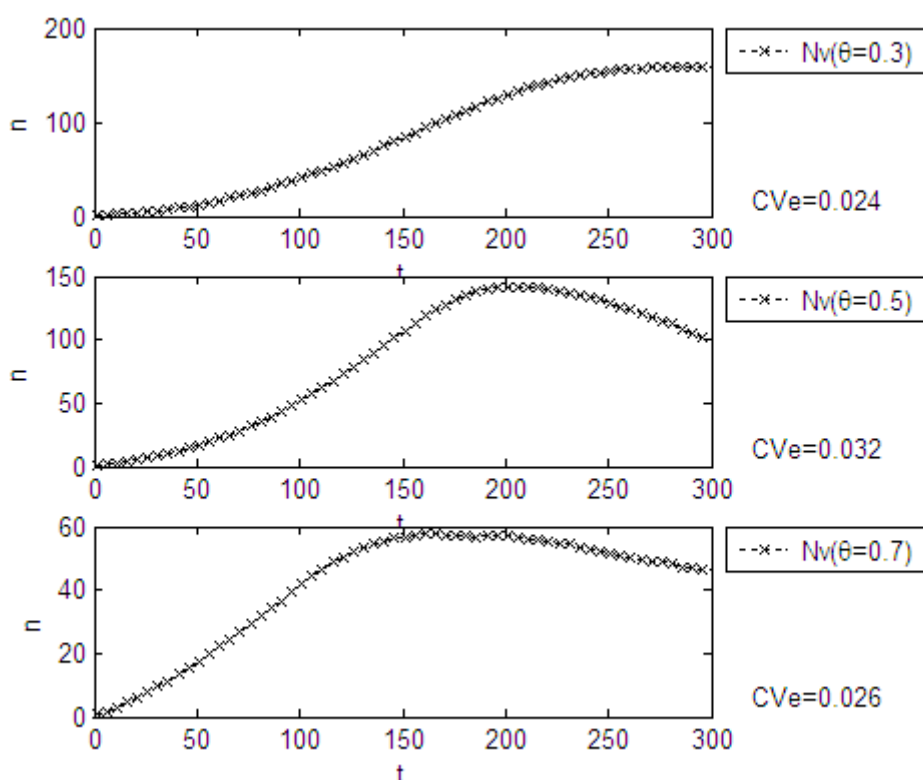


Figura 35. Evolución del número de variedades de productos de la industria para diferentes valores de θ .

En general el comportamiento es similar en los tres supuestos de θ : un rápido crecimiento en la etapa de despegue de la industria, en la que la renta aumenta aceleradamente, un pico máximo cuando la industria está próxima a su madurez,

seguido finalmente por una reducción en el número de variedades conforme la industria se desenvuelve en su última fase. Las características propias de estas fases están condicionadas por el grado de competitividad; no nos extraña que para un mercado muy competitivo ($\theta = 0,7$) el crecimiento en el número de variedades sea más lento y el valor final sea significativamente menor que para un mercado poco competitivo ($\theta = 0,3$).

5.3.3 Concentración industrial

Ahora nuestra atención se dirige principalmente al grado de concentración industrial que mide el índice de Herfindahl, Ec.(1.4) y (5.5), cuya serie temporal se ha representado en la Figura 36.

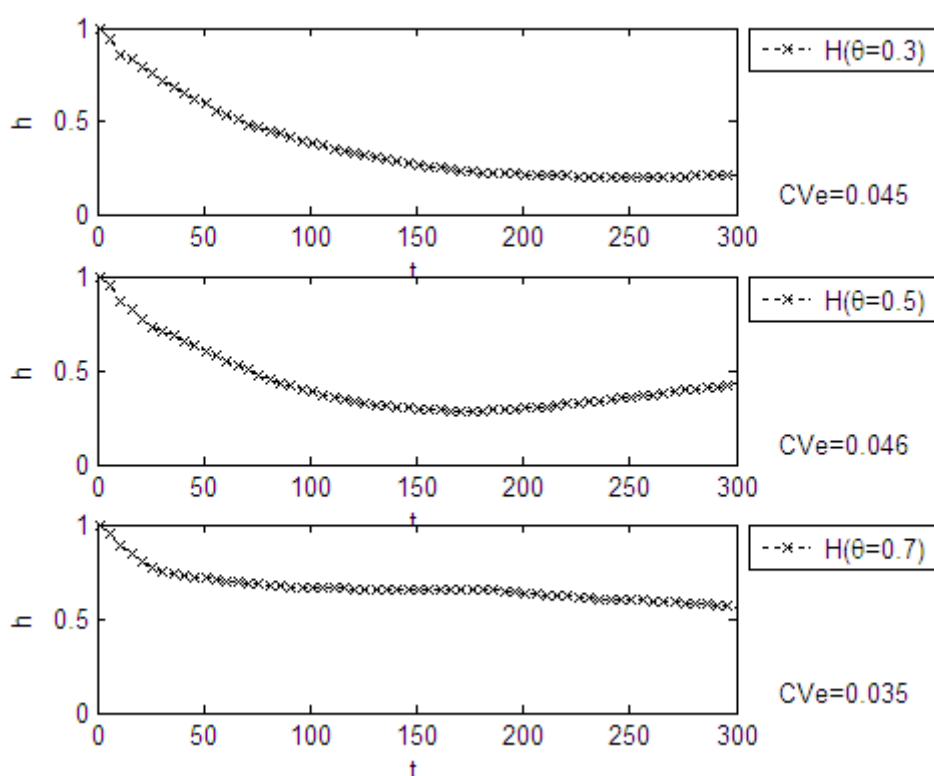


Figura 36. Evolución del índice de Herfindahl de la industria para diferentes valores de θ .

En las tres series se manifiesta un comportamiento similar: una concentración máxima en las etapas iniciales de la industria (algo esperado si tenemos en cuenta las condiciones iniciales definidas para las simulaciones), un descenso en los niveles de

concentración más o menos pronunciado durante la etapa de despegue, y finalmente un estabilización con la madurez de la industria¹⁴⁵.

Como era de esperar, la competitividad del mercado condiciona significativamente los resultados. Cuando existe una elevada competitividad ($\theta = 0,7$), la industria evoluciona hacia niveles importantes de concentración con un índice de Herfindahl promedio en el largo plazo algo mayor de 0,5 (ver Tabla 9). Utilizando el recíproco de H, significa que la concentración industrial se asemeja a una situación en la que 2 empresas se reparten por igual el mercado.

Este comportamiento de la industria con un mercado muy competitivo coincide con el de muchos otros modelos evolucionistas de dinámica industrial (Nelson & Winter, 1982; Andersen, 1996): cuanta más competitividad $\theta \rightarrow 1$ más presión de selección, y consecuentemente cualquier pequeña diferencia positiva entre las empresas ofrece una ventaja competitiva suficiente para crecer más rápidamente y ganar más poder de mercado.

Sin embargo, cuando la competitividad entre variedades es menor ($\theta = 0,3$) también el nivel de concentración que alcanza la industria en el largo plazo es más pequeño, alcanzando un valor medio final alrededor de 0,2 (ver Tabla 9). No obstante, este valor representa un significativo nivel de concentración que nos dice que aunque resulta mucho más fácil introducir en el mercado una variedad de producto rentable, son solo unas pocas empresas las que ofrecen la mayor cartera de productos.

5.3.4 Regularidades de la evolución de la industria

Nuestro modelo exhibe algunos comportamientos que se corresponden con algunas regularidades observadas en muchas industrias (Klepper, 1996; Klepper, 1997) y que vamos a comentar en este apartado.

¹⁴⁵ Naturalmente los valores cuantitativos obtenidos en estas simulaciones no pueden compararse con datos empíricos, principalmente porque las suposiciones iniciales sobre la renta y su evolución temporal, así como el esfuerzo en I+D de las empresas, el espacio de oportunidades tecnológicas, etc. han sido definidos arbitrariamente. Además, en los fenómenos de concentración industrial reales hay que tener en cuenta otras cuestiones relacionadas con la legislación que cada país tiene sobre la regulación de los mercados y los monopolios, así como fenómenos empresariales como las fusiones y adquisiciones que no entraban en el alcance del diseño del modelo.

Número de empresas, entradas y salidas de la industria

La Figura 37 recoge las series temporales de la evolución del número de empresas en la industria. El número de empresas experimenta un crecimiento sostenido, más acentuado en la etapa de despegue de la industria, hasta alcanzar un máximo. El pico depende de las características de competitividad del mercado θ , y suele ir acompañado de una disminución posterior aunque la producción aumente y los precios tiendan a disminuir. Este comportamiento general, teniendo en cuenta las características propias de nuestro modelo¹⁴⁶, se asemeja a la regularidad observada en la dinámica de las industrias (Klepper, 1996).

La evolución del número de empresas puede comprenderse mejor si observamos las series correspondientes de entradas y salidas de empresas en la industria, representada en la Figura 38. La serie temporal de salidas nos permite estudiar el efecto de los procesos de selección que como ya sabemos dependen en gran medida del nivel de preferencia por la variedad θ que muestran los consumidores.

¹⁴⁶ Este descenso posterior en el número de empresas, salvo para el supuesto de $\theta = 0,5$, no aparece muy claro en las series debido a que de forma arbitraria hemos decidido terminar las simulaciones en $t = 300$. Sin embargo, los procesos de selección se acentúan en la etapa de madurez en la que las empresas compiten por una renta que permanece constante, con lo que si prolongáramos algo más los periodos de simulación se observaría más claramente este descenso fruto de la salida de empresas del mercado. Además, también tenemos que tener en cuenta el proceso de entradas de nuevas empresas, y que hemos modelado con una distribución de Poisson de promedio de llegadas constante durante toda la simulación, lo que hace que aún en el largo plazo existan posibilidades de que entren nuevas empresas en la industria.

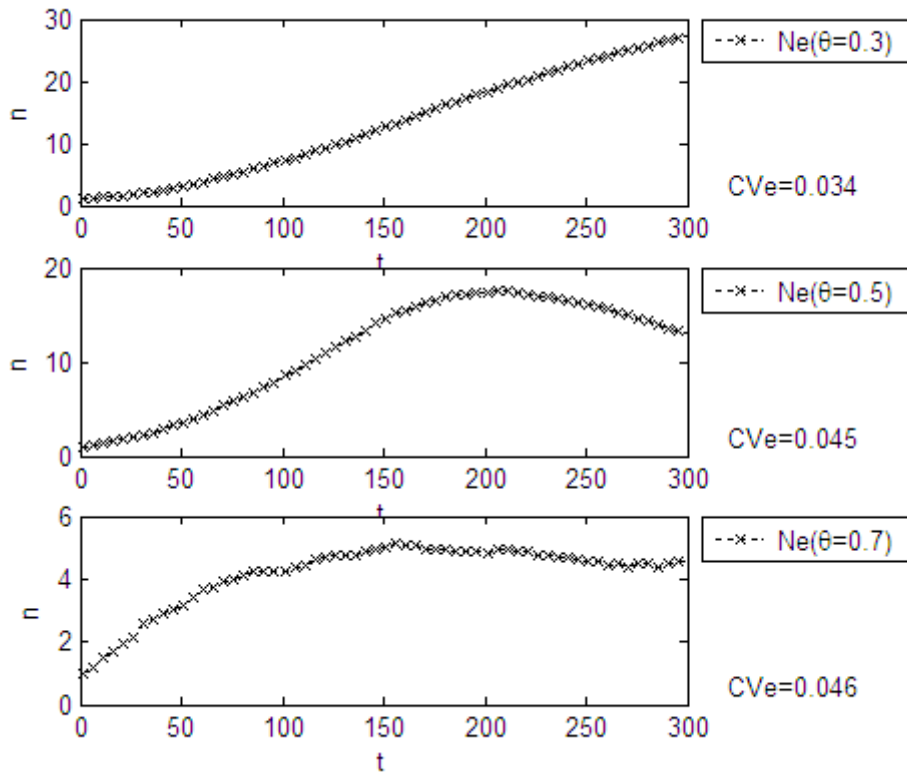


Figura 37. Evolución del número de empresas para diferentes valores de θ .

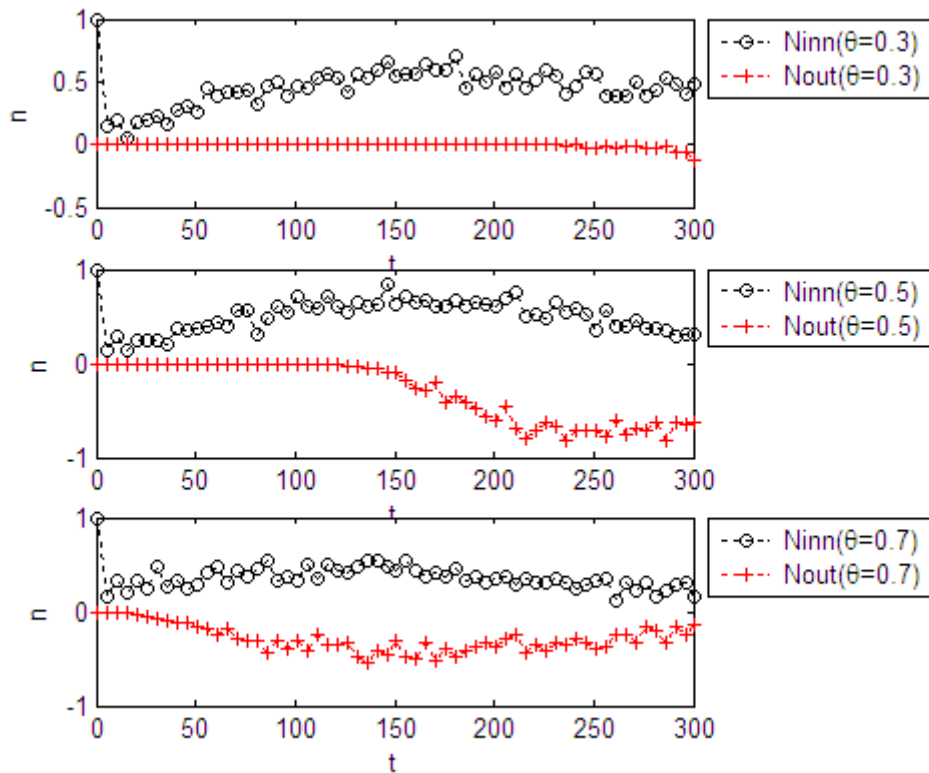


Figura 38. Entrada y salida de empresas de la industria para diferentes valores de θ .

La selección es menos rigurosa cuando $\theta = 0,3$, puesto que la mayor parte de las empresas que introducen una variedad en el mercado consiguen mantener su nicho durante bastante tiempo, aunque finalmente se muestran sus efectos en la etapa de madurez, cuando las empresas deben competir por una renta que ha dejado de crecer a los ritmos pasados. Cuando la selección es más severa ($\theta = 0,7$), sus efectos son más evidentes con salidas de empresas incluso en las etapas iniciales en las que el crecimiento de la renta es muy importante.

Las entradas en nuestro modelo responden, como ya hemos comentado, a dos dinámicas diferentes: una exógena, impuesta por un proceso aleatorio de Poisson de promedio de llegadas constante durante toda la simulación, y una endógena fruto de la actividad innovadora de las empresas, que se traduce en la creación de nuevas divisiones y ocasionalmente la aparición de empresas emergentes spin-offs. Todas las series de entrada muestran unos niveles máximos coincidentes con una importante actividad de I+D (Figura 40 y Figura 41) y significativa productividad del esfuerzo en innovación de nuevos productos.

Evolución de la empresa líder

La Figura 39 representa la serie temporal de la cuota de mercado de la *empresa líder*, para los tres supuestos de θ . Esta gráfica viene a reforzar todo lo dicho anteriormente sobre la concentración industrial. En los tres casos se observa como la primera empresa en el mercado tiende a estabilizarse con el tiempo manteniendo una posición de liderazgo importante, regularidad también observada en muchas industrias (Klepper, 1996).

Por ejemplo, en el supuesto de que los consumidores tengan una gran preferencia por la variedad ($\theta = 0,3$), lo que hace posible que convivan en el mercado una mayor oferta de productos, finalmente una empresa llega a acaparar casi la mitad de las ventas totales a través de sus diferentes divisiones productivas.

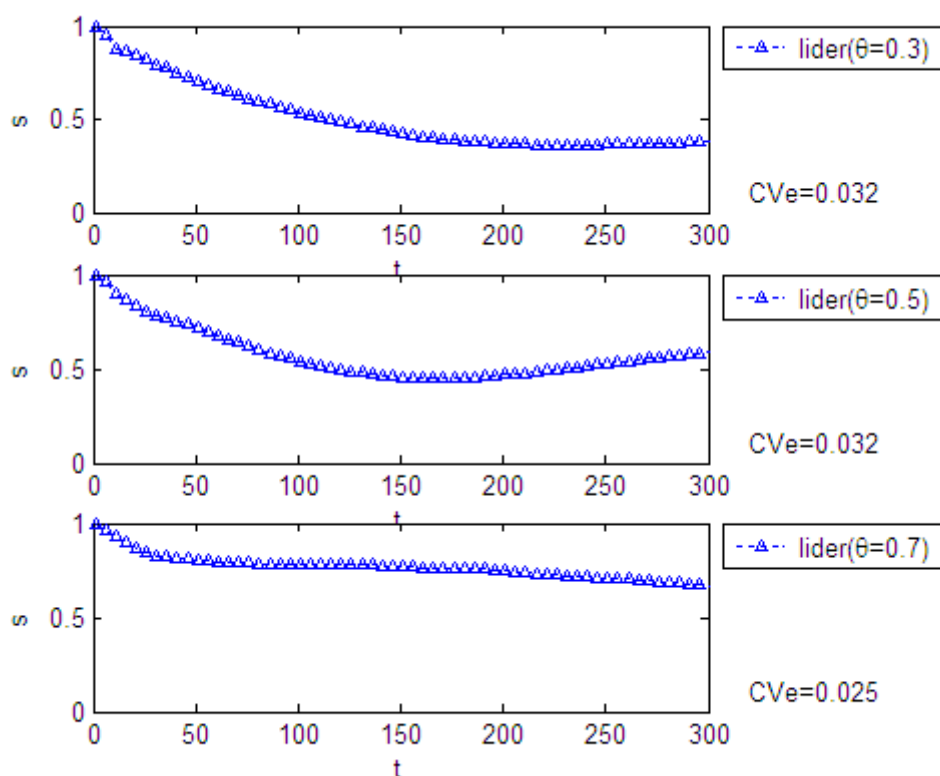


Figura 39. Evolución de la cuota de mercado del líder para diferentes valores de θ .

Procesos de innovación

Nuestro modelo contempla tres tipos de innovación, desde la más radical que supone la introducción de una nueva variedad de producto en el mercado, pasando por las mejoras en el producto y las mejoras en los procesos productivos.

En nuestra opinión, la diferenciación bastante extendida entre innovaciones de proceso e innovaciones de producto resulta algo confusa y de difícil aplicación al mundo real de las empresas. Frecuentemente una mejora en los procesos productivos va acompañada de una mejora en las características del producto, y viceversa, una mejora en las propiedades del producto obliga a introducir cambios en los procesos. Por esta razón, dentro del marco de competencia monopolística de nuestro modelo separamos claramente el proceso genuino de creación de un nuevo producto (que llamamos innovación de nuevas variedades), de los procesos de mejoras de las características de un producto y de mejoras en sus técnicas de fabricación.

La Figura 40 recoge la serie temporal del número de innovaciones de nuevas variedades de producto para los casos propuestos de θ . Algunos autores definen como una regularidad en la evolución de las industrias que el número de innovaciones de producto suele seguir una curva creciente con un máximo coincidente con el número máximo de empresas en la industria (Klepper, 1996).

En nuestro modelo, y para las innovaciones que suponen la aparición de nuevos productos, se observa un comportamiento parecido si bien condicionado por las características del mercado. Así, cuando el nivel de competitividad en el mercado es muy grande ($\theta=0,7$) el número de innovaciones máximo es más pequeño y el descenso posterior, conforme la industria evoluciona, es más acentuado que para el caso opuesto ($\theta=0,3$).

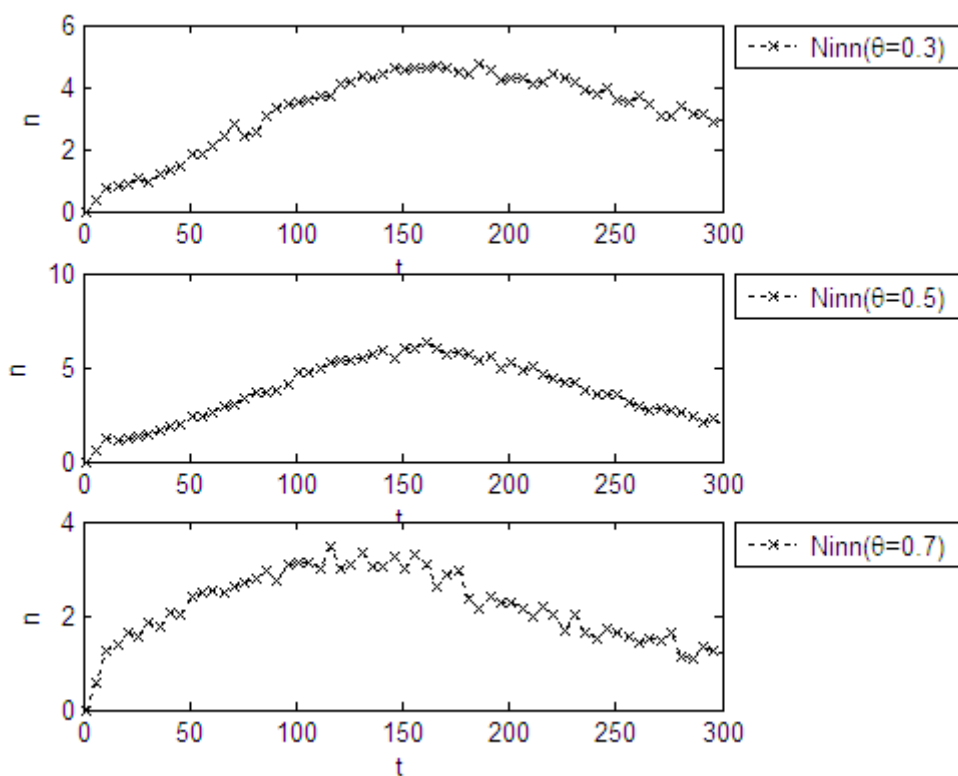


Figura 40. Evolución del número de innovaciones de nuevas variedades de productos para diferentes valores de θ .

Recordar que cada nueva variedad conlleva la creación de una nueva división productiva responsable de su fabricación, que generalmente se desarrolla dentro de la empresa padre y ocasionalmente se transforma en una nueva empresa emergente spin-off.

La Figura 41 recoge la serie temporal del número de innovaciones de proceso para los diferentes valores de θ propuestos. Debemos recordar que en nuestro modelo este tipo de innovaciones, así como las que hemos llamado como innovaciones de producto, se desarrollan a nivel de cada división productiva, y no de empresa como las anteriores.

Se observa en todas las series una evolución generalmente creciente a lo largo de todo el ciclo de la industria, menos sensible a las características del mercado θ . La razón de esto se encuentra en la cifra absoluta que manejamos. En el caso de un mercado con poca competitividad ($\theta=0,3$) se producen menos innovaciones por división, pero la industria alberga un mayor número de ellas (ver Figura 35). Mientras que cuando el grado de competitividad es grande ($\theta=0,7$), se producen más innovaciones por división aun cuando la población es más pequeña.

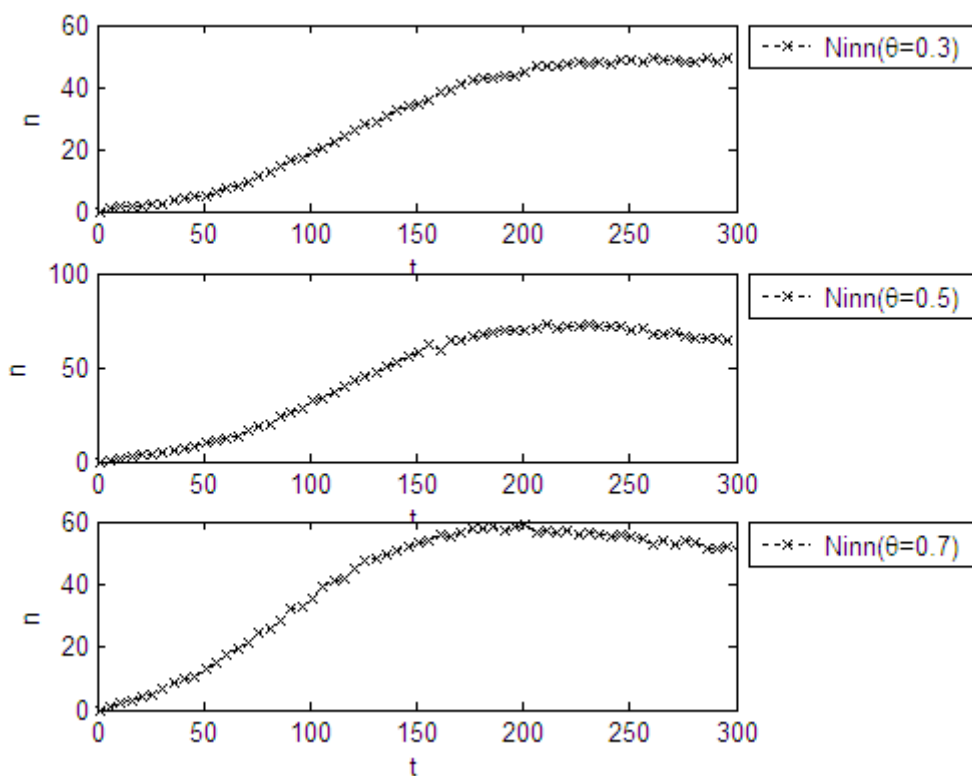


Figura 41. Evolución del número de innovaciones de proceso para diferentes valores de θ .

En nuestro modelo las innovaciones de producto y las innovaciones de proceso se desarrollan conjuntamente a nivel de división productiva con el objetivo de mejorar la preferencia de los consumidores por el producto y la competitividad de la división respectivamente. La evolución del número de innovaciones de producto es muy similar a esta gráfica.

5.3.5 Distribución del tamaño de las empresas

Distribución de potencia

La distribución del tamaño de las empresas en las industrias se caracteriza por seguir una ley de potencia, también llamada ley de Pareto¹⁴⁷, que nos dice que en una industria existen muy pocas empresas de gran tamaño y una mayoría de pequeñas y medianas empresas. Existen muchos estudios empíricos que muestran esta propiedad (Ijiri & Simon, 1977; Axtell, 2001).

Esta característica está presente en la distribución del tamaño de las empresas de nuestro modelo en todos los escenarios de simulación propuestos. En nuestro análisis, el tamaño de cada empresa $s_i(t)$ se obtiene como la suma de las ventas correspondientes de sus divisiones $j \in i$:

$$s_i(t) = \sum_{j \in i} p_j(t) q_j(t) \quad (5.23)$$

La distribución de los tamaños de las empresas s seguirá una ley de potencia si se cumple que:

$$sr^\beta = K \quad (5.24)$$

donde β, K son constantes propias de cada industria, y r representa la serie ascendente de ranking de las empresas, para la que la empresa más grande toma el valor de $r = 1$ y la empresa más pequeña el último valor.

La Ec.(5.24) se puede expresar de forma lineal para que sea más sencillo su ajuste por simple regresión:

$$\ln s = \ln K - \beta Lnr \quad (5.25)$$

¹⁴⁷ En la literatura geográfica se suele utilizar el nombre de ley Zipf cuando se habla de la distribución del tamaño de las ciudades.

La Figura 42 representa la distribución del tamaño de las empresas de la industria en el largo plazo ($t = 300$) para dos muestras representativas de $\theta = 0,3$ y $\theta = 0,7$.

En los dos supuestos de θ , una recta de la familia de la Ec.(5.25) parece ajustarse correctamente. Si bien, la distribución de potencia se aprecia mejor en el supuesto de $\theta = 0,3$, puesto que, como ya sabemos, la menor competitividad entre variedades de producto facilita que haya un mayor número de empresas en la industria, haciendo más rico el ajuste de regresión correspondiente.

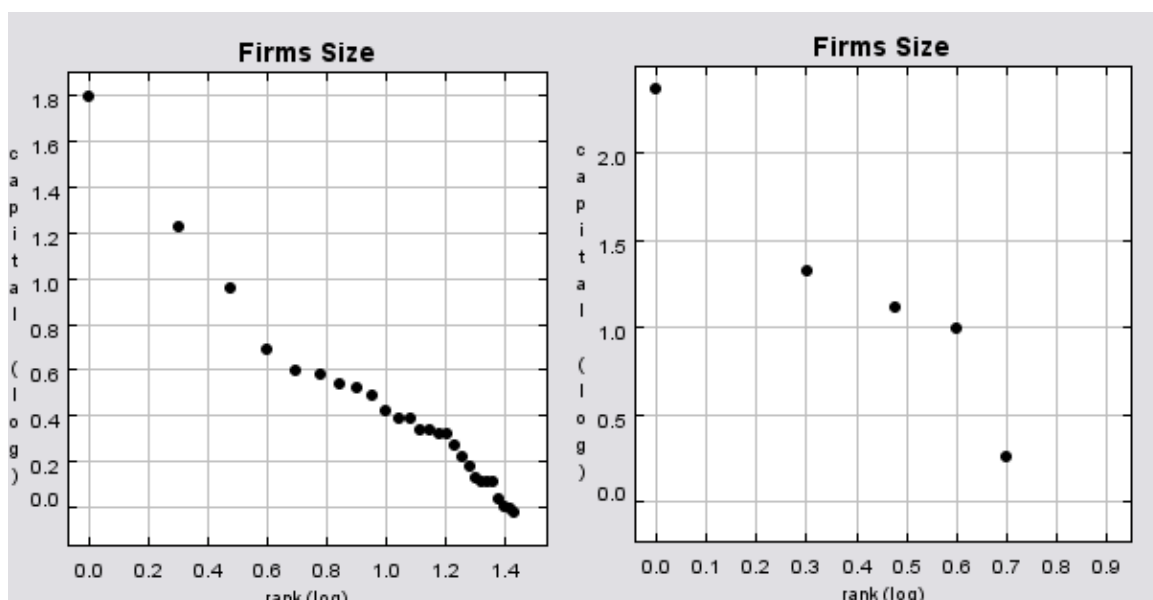


Figura 42. Distribución final del tamaño de las empresas para dos muestras representativas de $\theta = 0,3$ (izquierda) y $\theta = 0,7$ (derecha).

El tamaño de cada empresa corresponde a las ventas de todas sus divisiones. En ambos casos se aprecia claramente que las distribuciones responden a una distribución de potencia, aun cuando la competitividad en el mercado sea muy grande ($\theta = 0,7$) y finalmente sobrevivan muy pocas empresas.

Stock de capital de las empresas

La Figura 43 muestra la evolución del stock de capital de las empresas a través de las series temporales del promedio y el máximo en la industria. Estas gráficas se corresponden con la descripción de la evolución de la industria que hemos analizado hasta el momento. Podemos comparar los dos casos extremos: así cuando los consumidores aprecian mucho la variedad con $\theta = 0,3$, la menor competitividad entre

empresas permite que permanezcan un mayor número de ellas en la industria y consecuentemente el capital promedio es menor que el supuesto opuesto; cuando $\theta = 0,7$, la mayor fuerza de la selección del mercado conduce a una industria con pocas empresas y capital promedio significativamente más grande.

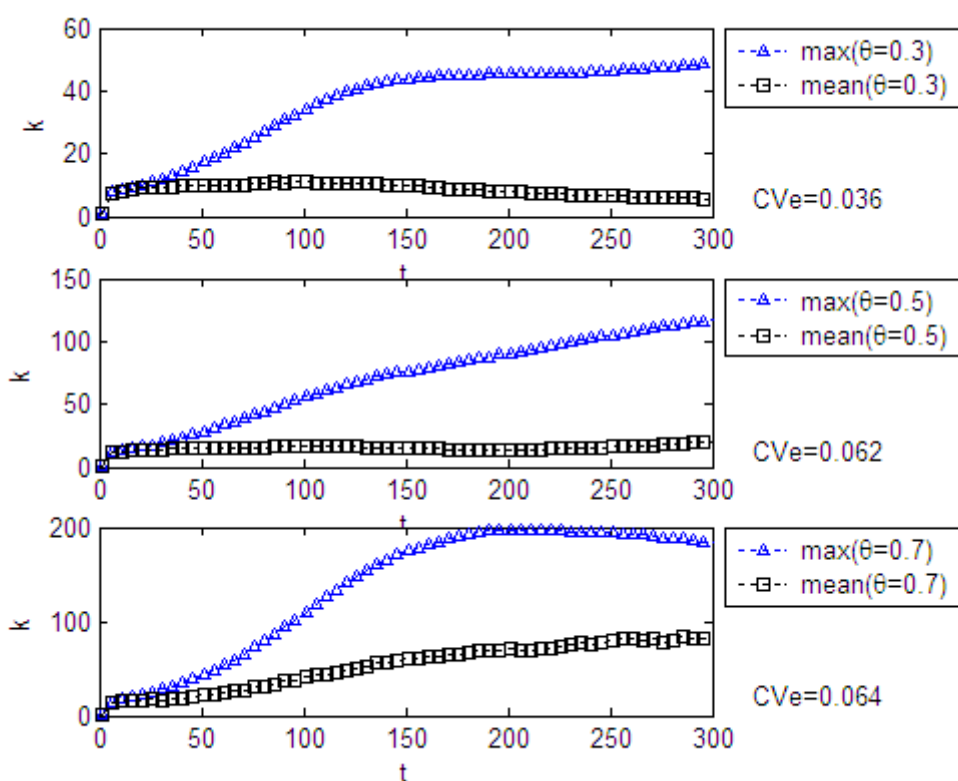


Figura 43. Evolución del capital de las empresas (promedio y máximo) para diferentes valores de θ .

Esta característica del stock de capital de las empresas resulta interesante por cuanto nos invita a pensar que el tamaño de las empresas en una industria determinada no solo está condicionado por las inversiones fijas necesarias (definidas en el modelo por los parámetros de capital fijo de empresa y de división), sino también en gran medida por la naturaleza del mercado de competencia monopolística.

En todas las series se observa claramente la diferencia significativa entre el stock de capital de la empresa más grande y el correspondiente valor medio en la industria, diferencia que crece con el tiempo. Esto es consecuencia de la distribución desigual del tamaño de las empresas que sigue una ley de potencia.

5.3.6 Estado de la industria en el largo plazo

Estadísticos finales de la industria

A modo de resumen hemos elaborado la Tabla 9 donde se recogen los valores que alcanzan al final de las simulaciones los principales estadísticos utilizados para describir la evolución de la industria.

Tabla 9. Indicadores representativos del estado de la industria en el largo plazo $t = 300$ (promedio y error estándar).

	Precio	Herfindahl	Nempresas	Nvariedades	R2 Ec.(5.25)
$\theta = 0,3$	0,8023 (0,0160)	0,2091 (0,0118)	27,41 (0,7773)	158,79 (2,9932)	0,9598 (0,0032)
$\theta = 0,5$	0,2333 (0,0083)	0,4261 (0,0188)	12,87 (0,6697)	98,94 (3,6232)	0,9464 (0,0045)
$\theta = 0,7$	0,0854 (0,0013)	0,5624 (0,0241)	4,58 (0,2281)	46,25 (0,8621)	0,8882 (0,0098)

La tabla sintetiza los principales resultados que hemos discutido hasta el momento:

- El precio refleja fielmente el grado de competitividad entre variedades de productos en el mercado: conforme aumenta la competitividad, en la medida en que los consumidores aprecian menos la diversidad, el índice de precios disminuye.
- El índice de Herfindahl nos habla del nivel de concentración industrial. Bajo la suposición de competencia monopolística, mayor nivel de competitividad entre variedades ($\theta = 0,7$) equivale a más presión de selección y consecuentemente, a mayores niveles de concentración.
- El número de empresas que finalmente sobreviven en la industria está condicionado por las fuerzas de selección anteriormente mencionadas.

- El número de variedades claramente depende de las preferencias por la variedad de productos que muestran los consumidores θ , siendo mayor cuanto más grandes sean estas preferencias.
- La última columna recoge el coeficiente de determinación de la regresión de la Ec.(5.25). La ley de potencia describe bastante bien la distribución del tamaño de las empresas en todos los supuestos¹⁴⁸.

Función de distribución del índice de Herfindahl

Las series temporales descritas hasta el momento nos hablan siempre de la evolución del promedio de un determinado estadístico. Esta información que aporta la media muestral puede no ser suficiente, siendo interesante completarla para disponer de una descripción más completa del sistema. Con este objetivo, vamos a analizar con más detalle el estado final de la industria a través del estadístico que nos describe el grado de concentración industrial.

La Figura 44 representa la estimación núcleo (Bowman & Azzalini, 1997) de la función de distribución del índice de Herfindahl para los tres valores de θ contemplados en nuestro estudio. Esta función de distribución nos habla de la *dependencia histórica* en la evolución de la industria, que hace imposible a un observador externo determinar a priori el estado final de la industria (proceso no ergódico). El grado de concentración industrial depende de la secuencia de ocurrencias históricas (de naturaleza aleatoria) que suceden durante la simulación. No obstante, la característica no determinista de la evolución de la industria queda descrita completamente a través de la función de distribución estimada en el largo plazo.

Comparando los supuestos de θ , en todos los casos la industria tiende a niveles significativos de concentración, de hecho la probabilidad de que el índice de Herfindahl sea $H \leq 0,05$ es muy pequeña.

El efecto de la competitividad del mercado definido por θ aparece claramente representado en las formas de las diferentes curvas de $f(H)$ estimadas. Así cuando la

¹⁴⁸ Si bien para el caso de $\theta = 0,7$ el estadístico es menos representativo por tratarse de muy pocas empresas.

competitividad entre variedades en el mercado es pequeña ($\theta = 0,3$), la función de distribución está desplazada hacia la izquierda (rango de concentraciones más pequeño) en torno al valor medio de $H = 0,209$ (0,012). Conforme aumenta el grado de competitividad entre productos, la función se desplaza hacia la derecha, a la vez que aumenta el rango de posibles valores de H .

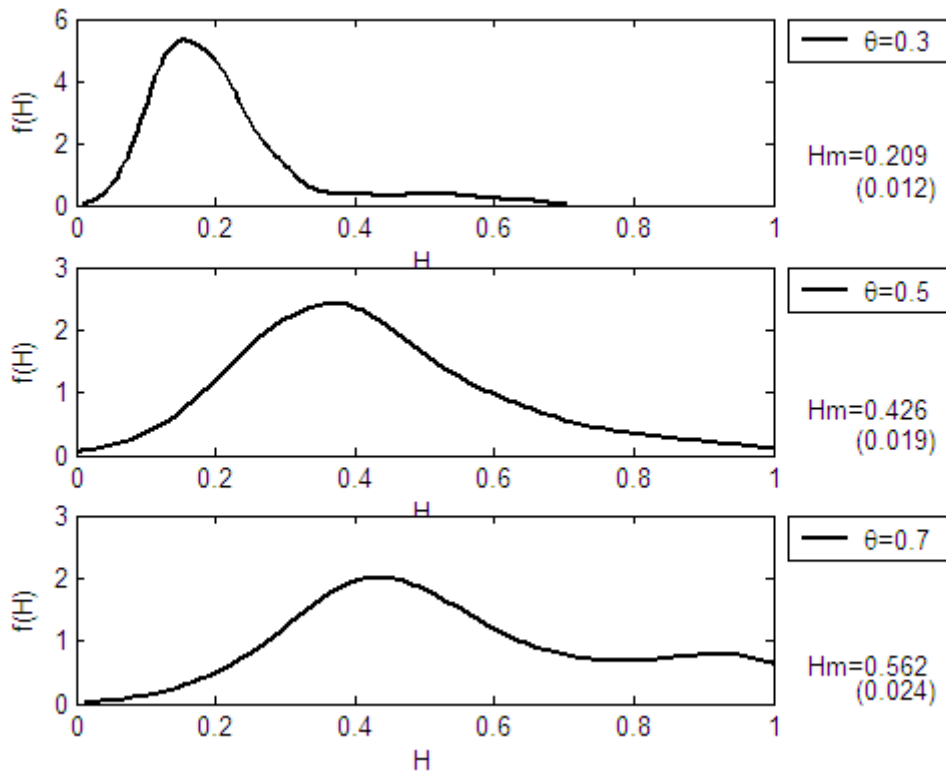


Figura 44. Estimación kernel de la función de distribución del índice de Herfindahl de la industria en el largo plazo $t = 300$ para diferentes valores de θ .

Resulta interesante observar que, a diferencia de los otros dos supuestos $\theta = 0,3$ y $\theta = 0,5$, cuando $\theta = 0,7$ existe una probabilidad significativa de que el índice de Herfindahl alcance un valor próximo a 1 (situación de monopolio).

5.4 Fenómenos de aglomeración industrial

En este apartado vamos a estudiar la dimensión espacial de la evolución de la industria, que acompaña a los fenómenos de concentración industrial que hemos

descrito antes. Para ello, hemos planteado diferentes escenarios de simulación donde las empresas se encuentran localizadas en distintas regiones.

Podría interpretarse que en el modelo existe una cierta competencia entre regiones. Sin embargo, desde una perspectiva evolucionista, son las empresas las que individualmente compiten en la industria, determinando el desarrollo de las regiones donde estén localizadas. Si bien, el desarrollo de cada región a su vez influirá en el de las empresas allí localizadas a través de knowledge spillovers. Nuestro objetivo en este apartado es analizar la evolución espacial y su relación con la competitividad entre variedades existente en el mercado.

5.4.1 Dos regiones: núcleo y periferia

En la literatura sobre Geografía Económica se suele denominar al caso de dos regiones como núcleo-periferia, en directa relación al supuesto de que la industria se localiza completamente en una de ellas (núcleo) en detrimento de la otra (periferia).

Coefficiente de Gini e índice de Herfindahl

En este escenario de simulación bi-regional la aglomeración espacial aparece cuando el peso de la actividad industrial está localizado principalmente en una de las regiones. En el apartado anterior, demostramos como el grado de competitividad existente en el mercado influye en que la actividad industrial esté más o menos concentrada en unas pocas empresas.

Recordemos la Figura 39 que muestra la evolución de la empresa líder. Podemos observar que en la dinámica de la industria existe siempre una empresa destacada sobre las demás que acapara importantes cuotas de mercado en todos los supuestos de θ , llegando a tener valores significativamente superior al 50% de la cuota total cuando la competitividad entre productos es más feroz ($\theta = 0,3$). No nos ha de extrañar entonces, que la industria muestre también importantes niveles de aglomeración espacial, toda vez que la empresa líder se localiza en una única región, y que esta aglomeración dependa también del nivel de competitividad del mercado.

La Figura 45 muestra las series temporales del coeficiente de Gini para diferentes valores del parámetro θ . En el caso de dos regiones, este coeficiente que

calculamos usando la Ec.(5.8) está siempre comprendido entre (0-0,5), correspondiendo el valor de 0 a una industria simétricamente repartida, y el valor de 0,5 a una industria localizada completamente en una región (estructura núcleo-periferia).

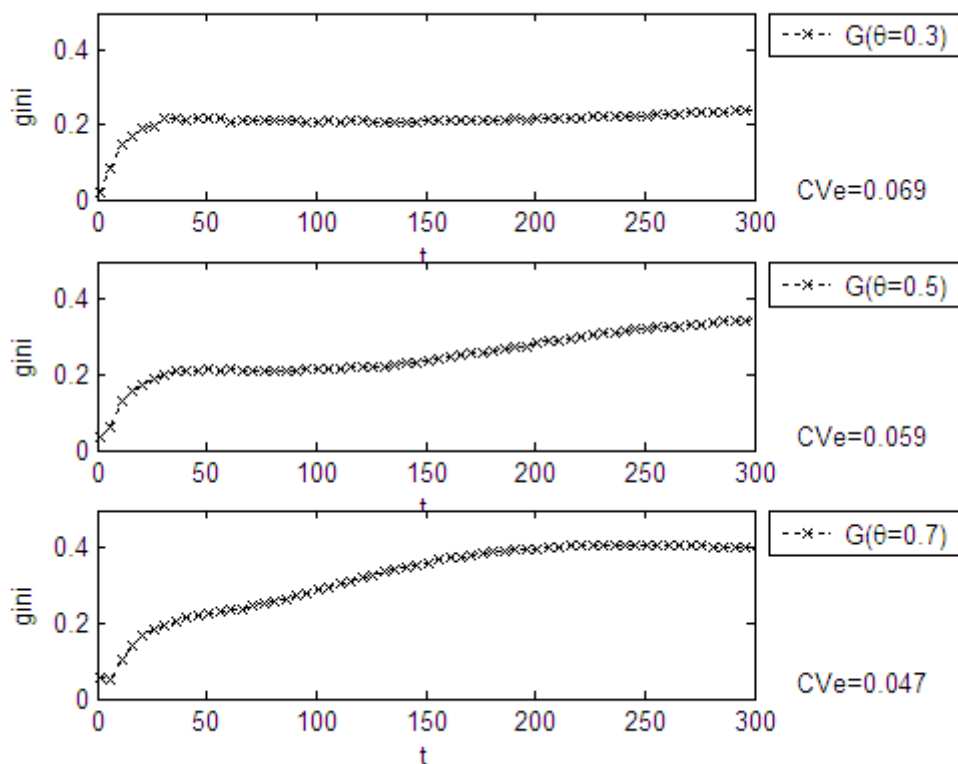


Figura 45. Evolución del coeficiente de Gini cuando en la industria existen dos regiones para diferentes valores de θ .

En general la industria tiende a estar asimétricamente repartida entre las dos regiones para todos los supuestos de θ , lo que está de acuerdo con muchos estudios sobre concentración industrial (Scherer & Ross, 1990; Jaffe *et al.*, 1993; Audretsch & Feldman, 1996).

Nuestro modelo además nos dice que el grado de aglomeración depende significativamente del mercado y del nivel de competitividad entre variedades que imponen los consumidores con su mayor o menor preferencia por la variedad. Así por

ejemplo, cuando la competitividad en el mercado es muy grande ($\theta = 0,7$), la industria tiende preferentemente a una estructura de núcleo-periferia¹⁴⁹.

La dinámica de concentración industrial es muy semejante al escenario ya descrito de una región. La Figura 46 nos muestra unas series temporales del índice de Herfindahl muy parecidas a las ya observadas en la Figura 36. El efecto de los knowledge spillovers en este escenario de dos regiones es principalmente el de empujar la actividad de la industria hacia una de ellas, donde se desarrolla en un contexto de selección muy parecido al descrito para una región.

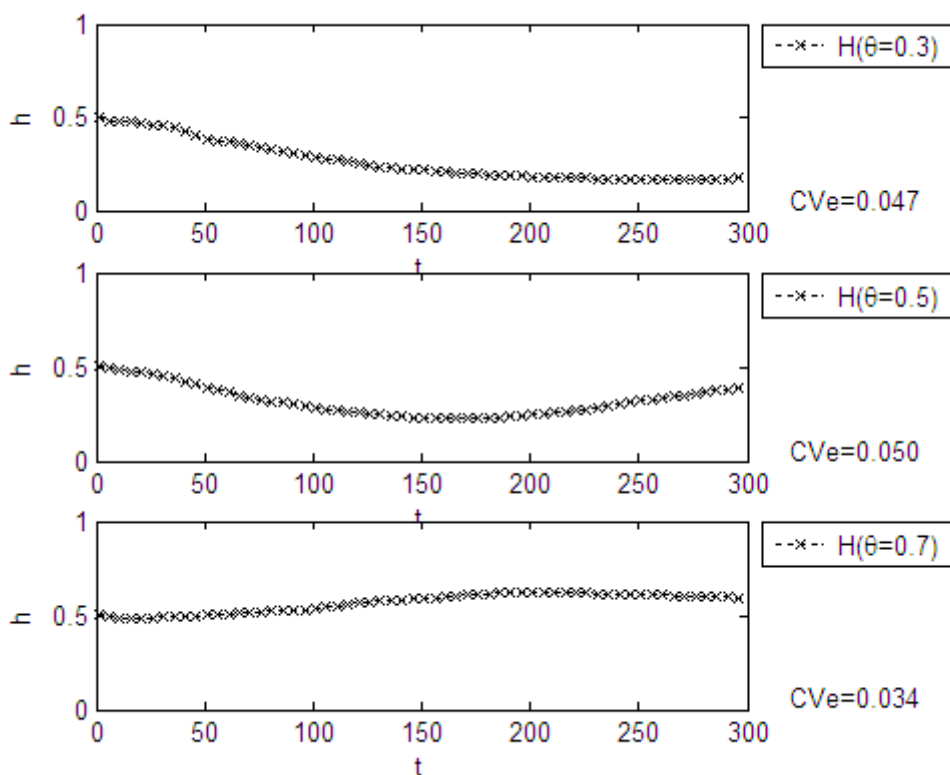


Figura 46. Evolución del índice de Herfindahl cuando en la industria existen dos regiones para diferentes valores de θ .

¹⁴⁹ No se alcanza un valor exacto de $G=0,5$ debido al ruido que introduce en el modelo la llegada aleatoria de nuevas empresas durante toda la simulación, y que se localizan en una de las dos regiones con la misma probabilidad.

Estado de la industria en el largo plazo

La Tabla 10 resume los valores finales ($t = 300$) de los principales estadísticos que utilizamos para describir la dinámica de la industria. Como ya hemos comentado, las propiedades puramente económicas (precio, índice de Herfindahl, número de variedades, número de empresas) son muy parecidas a las ya descritas en el primer escenario de simulación, puesto que las condiciones de selección que impone el mercado apenas difieren entre una y dos regiones.

El efecto de los knowledge spillovers se deja notar principalmente en los niveles de aglomeración espacial medidos por el coeficiente de Gini, que van desde el 0,24 para $\theta = 0,3$ hasta el 0,39 para $\theta = 0,7$, muy próximo a la condición de núcleo-periferia.

Tabla 10. Indicadores representativos del estado de la industria en el largo plazo $t = 300$ (promedio y error estándar) para el escenario con dos regiones.

	Precio	Herfindahl	Gini	Nempresas	Nvariedades	R2 Ec.(5.25)
$\theta = 0,3$	0,9103 (0,0152)	0,1734 (0,0099)	0,2409 (0,0158)	31,01 (0,8602)	168,49 (2,7530)	0,9650 (0,0024)
$\theta = 0,5$	0,2881 (0,0111)	0,3971 (0,0214)	0,3491 (0,0152)	14,77 (0,7455)	116,40 (5,0537)	0,9521 (0,0030)
$\theta = 0,7$	0,0908 (0,0017)	0,5906 (0,0240)	0,3957 (0,0154)	4,53 (0,2236)	43,89 (1,0303)	0,8961 (0,0109)

La Tabla 11 compara los índices de Herfindahl de los dos escenarios de simulación, y nos muestra las diferencias muy poco significativas en el grado de concentración industrial que alcanza la industria, por las razones ya expuestas anteriormente¹⁵⁰.

¹⁵⁰ Si bien la comparación entre ambos escenarios presenta un pequeño sesgo debido a las diferentes condiciones iniciales de la industria que hemos impuesto en el modelo. La industria comienza siempre con una empresa ubicada en cada región, lo que en la práctica supone iniciar la simulación con más o menos empresas establecidas dependiendo del número de regiones parametrizadas.

Tabla 11. Comparación del índice de Herfindahl en el largo plazo $t = 300$ entre los escenarios con una región y con dos regiones (promedio y error estándar).

	Herfindahl (1 región)	Herfindahl (2 regiones)
$\theta = 0,3$	0,2091 (0,0118)	0,1734 (0,0099)
$\theta = 0,5$	0,4261 (0,0188)	0,3971 (0,0214)
$\theta = 0,7$	0,5624 (0,0241)	0,5906 (0,0240)

Resulta interesante describir estadísticamente el estado final que alcanza la industria en el largo plazo, incorporando más información que la que nos ofrece las series temporales de los promedios de los estadísticos que hemos descrito antes. Al igual que procedimos en el análisis de una región, hemos estimado las funciones de distribución del coeficiente de Gini para los tres supuestos de θ (ver Figura 47).

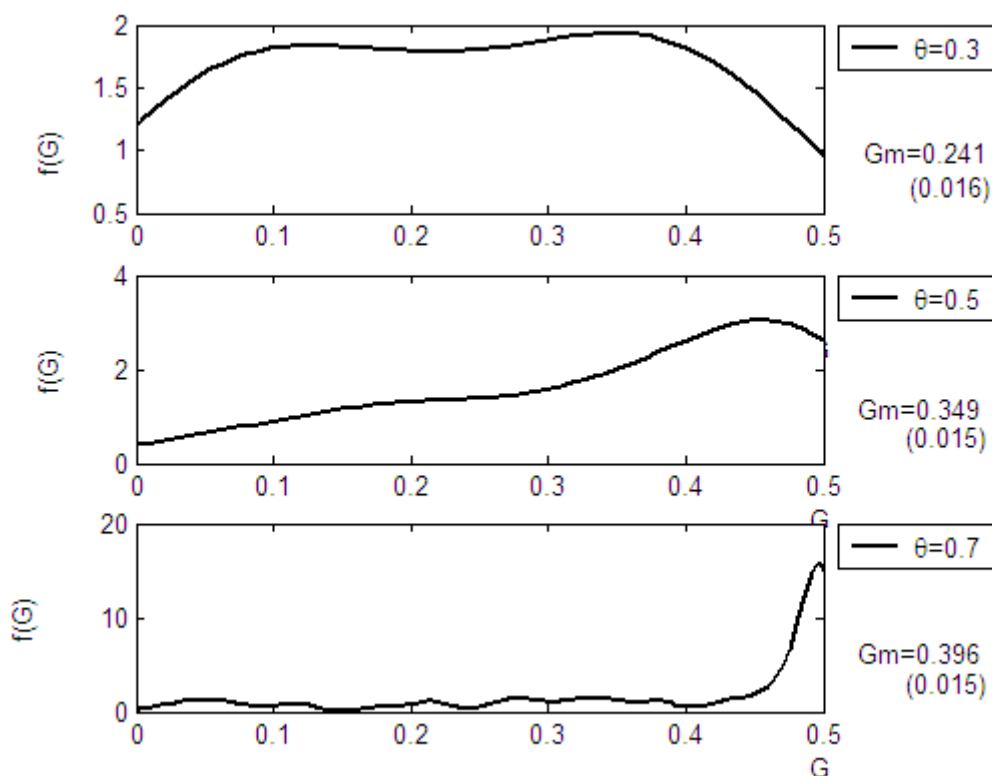


Figura 47. Estimación kernel de la función de distribución del coeficiente de Gini en el largo plazo $t = 300$ cuando en la industria existen dos regiones para diferentes valores de θ .

Las funciones de distribución nos ayudan a comprender mejor el comportamiento real del modelo, más allá de la caracterización mediante un estadístico de tendencia central que puede esconder información relevante. Por ejemplo, cuando la competitividad entre variedades en el mercado es pequeña ($\theta = 0,3$) el rango de posibles valores del coeficiente de Gini es muy amplio, puesto que la distribución de probabilidad se asemeja a una distribución uniforme. Observamos que existe una probabilidad significativa de que la industria termine repartida equitativamente entre las dos regiones ($G \leq 0,05$), o que se concentre en una sola de ellas ($G \geq 0,45$).

Esta característica de las propiedades estadísticas del estado de la industria en el largo plazo para $\theta = 0,3$ es muy interesante, pues nos dice que un determinado nivel de concentración industrial (índice de Herfindahl en la Figura 44) puede responder a una amplia diversidad de estructuras espaciales (coeficiente de Gini en la Figura 47).

Por último podemos observar que cuando el grado de competitividad en el mercado es muy grande ($\theta = 0,7$), la industria tiende preferentemente a un estado de máxima concentración espacial (núcleo-periferia).

5.4.2 Múltiples regiones

Vamos a extender aún más los escenarios de simulación analizados incorporando cinco regiones a la industria¹⁵¹. Como en el caso anterior, prestaremos especial atención a los fenómenos de aglomeración espacial y cómo se ven condicionados por el nivel de competitividad en el mercado.

¹⁵¹ Las conclusiones obtenidas del supuesto con cinco regiones son similares a otros escenarios también simulados con diferentes números de regiones (cuatro, seis y ocho). No hemos considerado simular con números mayores porque no parecer tener mucho sentido plantear escenarios con un gran número de regiones que difícilmente pueden encontrarse en los fenómenos reales.

Coefficiente de Gini e índice de Herfindahl

La Figura 48 representa la evolución temporal del coeficiente de Gini para los diferentes supuestos de θ . Bajos las suposiciones de este escenario el coeficiente, Ec.(5.8), varía dentro del rango (0-0,8), cuyos extremos corresponden a una industria igualmente repartida y una industria localizada en una única región respectivamente.

Todas las series muestran un significativo nivel de aglomeración espacial al final de la vida de la industria, con $G \geq 0,4$. Observando con detalle los primeros periodos, vemos que los knowledge spillovers tienen un efecto importante en las etapas iniciales, en las que se experimenta una importante aceleración del proceso de divergencia en el crecimiento de la actividad industrial de las cinco regiones.

Las simulaciones realizadas vienen a reafirmar las inferencias efectuadas con los datos del escenario anterior sobre la influencia de las características del mercado en los fenómenos de aglomeración espacial. Así, en mercados con poca competitividad entre variedades ($\theta = 0,3$), la industria alcanza rápidamente un significativo nivel de aglomeración que permanece estable durante todo el ciclo de vida, y que se corresponde aproximadamente a un reparto en el que dos de las cinco regiones acaparan la mayor parte de la actividad industrial ($G = 0,4$).

Conforme aumenta el grado de competitividad en el mercado ($\theta = 0,5$), aumenta simultáneamente la aglomeración industrial. La dinámica de aglomeración llega a ser máxima cuando la competitividad es muy elevada ($\theta = 0,7$), concentrándose casi la totalidad de la industria en una única región ($G = 0,7$).

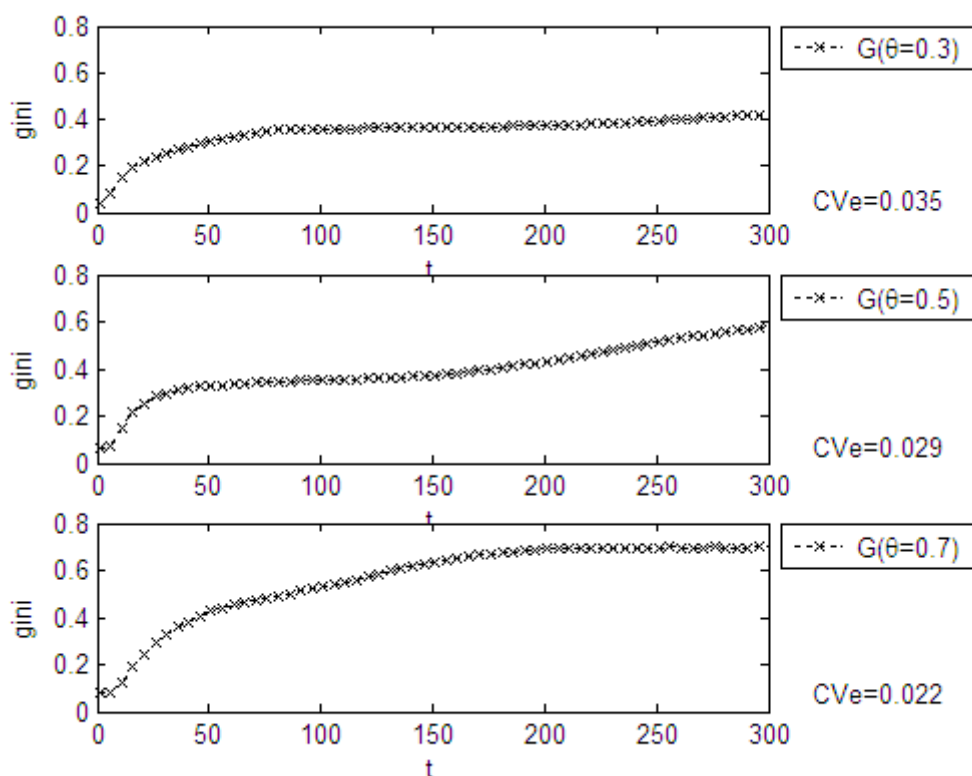


Figura 48. Evolución del coeficiente de Gini cuando en la industria existen cinco regiones para diferentes valores de θ .

Utilizando el símil de fuerzas, tan extendido en la literatura sobre la Nueva Geografía Económica, podemos resumir las observaciones anteriores de la siguiente forma: las fuerzas de aglomeración dependen principalmente del nivel de competitividad entre variedades en el mercado¹⁵², siendo más importantes cuando la competitividad, y consecuentemente la presión de los procesos de selección, es más grande ($\theta \rightarrow 1$).

Mirando ahora a los fenómenos puramente económicos, analizaremos como los fenómenos de aglomeración espacial afectan a la dinámica de concentración industrial. La Figura 49 muestra la evolución del índice de Herfindahl de concentración industrial.

¹⁵² No hemos utilizado hasta el momento este término porque en nuestro modelo no existen fuerzas de aglomeración como tal. Las únicas fuerzas explícitas son las de la selección del mercado, que hacen que las empresas crezcan o desaparezcan de la industria con el consiguiente efecto en el desarrollo de las regiones y la aglomeración espacial. Los knowledge spillovers tampoco pueden considerarse en sí mismos como una fuerza de aglomeración, sino como unos procesos localizados (dependen de cada región) que tienen un efecto más o menos importante en la selección y consecuentemente en los fenómenos de aglomeración espacial.

El comportamiento de las tres serie temporales es bastante parecido al ya descrito en los escenarios anteriores, si bien se observa que la industria alcanza menores cuotas de concentración cuando la competitividad en el mercado es pequeña ($\theta = 0,3$).

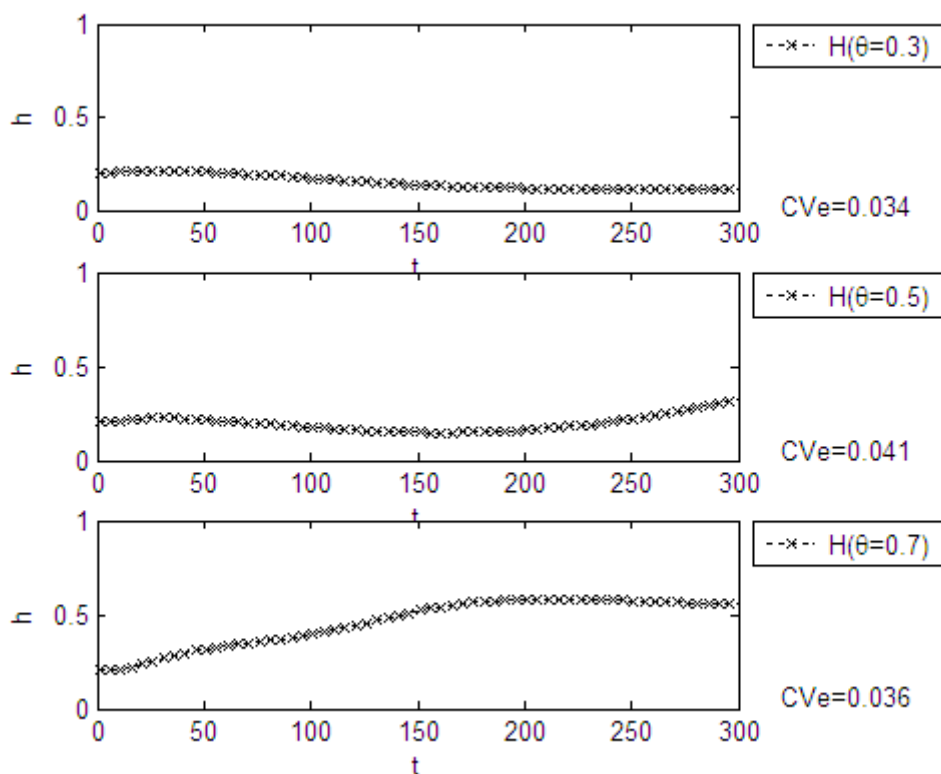


Figura 49. Evolución del índice de Herfindahl cuando en la industria existen cinco regiones para diferentes valores de θ .

La explicación a este hecho resulta coherente con la conclusión obtenida sobre las fuerzas de aglomeración en una industria diferenciada. Cuando la competitividad en el mercado es reducida, las fuerzas de aglomeración no son grandes, permitiendo que la industria prospere en las diversas regiones. En esta situación, la mayoría de las empresas no disfrutan de ventajas significativas por el hecho de estar en una u otra región, por lo que comparten las mismas probabilidades de sobrevivir a los procesos de selección, de por sí ya débiles.

Estado de la industria en el largo plazo

La caracterización el estado de la industria en el largo plazo a partir de los valores finales que alcanzan los principales estadísticos de estudio se recoge en la Tabla 12. Las propiedades económicas siguen siendo muy parecidas a los escenarios descritos

en apartados anteriores, con la salvedad de lo ya comentado sobre el coeficiente de concentración industrial de Herfindahl.

Igualmente se observa que la distribución espacial, descrita por el coeficiente de Gini, tiende a mayores cuotas de aglomeración conforme el nivel de competitividad entre variedades de productos θ crece.

Tabla 12. Indicadores representativos del estado de la industria en el largo plazo $t = 300$ (promedio y error estándar) para el escenario con cinco regiones.

	Precio	Herfindahl	Gini	Nempresas	Nvariedades	R2 Ec.(5.25)
$\theta = 0,3$	1,0758 (0,0137)	0,1123 (0,0047)	0,4221 (0,0139)	37,31 (0,9214)	190,30 (2,1968)	0,9646 (0,0018)
$\theta = 0,5$	0,3860 (0,0116)	0,3264 (0,0181)	0,5853 (0,0139)	19,74 (0,8420)	146,73 (5,6292)	0,9512 (0,0031)
$\theta = 0,7$	0,1047 (0,0017)	0,5610 (0,0223)	0,7049 (0,0106)	4,67 (0,2301)	45,19 (0,9380)	0,8923 (0,0109)

La Tabla 13 es un resumen comparativo de los niveles de concentración industrial medidos por el índice de Herfindahl para diferentes números de regiones. Hemos añadido el resultado de un escenario con 8 regiones, a los ya vistos hasta el momento. Esta tabla permite apreciar más fácilmente el efecto comentado del número de regiones en la concentración industrial. Así, cuando la competitividad entre variedades no es muy grande ($\theta = 0,3$ y $\theta = 0,5$), el índice de Herfindahl se reduce conforme la industria se desarrolla desde el comienzo en más regiones porque la industria mantiene más fácilmente la diversidad de empresas iniciales repartidas entre las distintas regiones.

Tabla 13. Comparación del índice de Herfindahl en el largo plazo $t = 300$ entre los escenarios con diferentes número de regiones (promedio y error estándar).

Herfindahl (1 región)	Herfindahl (2 regiones)	Herfindahl (5 regiones)	Herfindahl (8 regiones)
--------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------

$\theta = 0,3$	0,2091 (0,0118)	0,1734 (0,0099)	0,1123 (0,0047)	0,0870 (0,0039)
$\theta = 0,5$	0,4261 (0,0188)	0,3971 (0,0214)	0,3264 (0,0181)	0,2512 (0,0168)
$\theta = 0,7$	0,5624 (0,0241)	0,5906 (0,0240)	0,5610 (0,0223)	0,5963 (0,0238)

Para concluir nuestro análisis al escenario planteado de cinco regiones, hemos estimado la función de distribución del coeficiente de Gini (Figura 50), con el objetivo ya conocido de poder describir más exactamente la naturaleza estocástica del estado de aglomeración espacial que alcanza la industria en el largo plazo.

Para el supuesto de poca competitividad entre variedades en el mercado con $\theta = 0,3$ el rango de posibles valores del coeficiente de Gini es amplio, aunque la probabilidad de que la industria quede repartida por igual entre las cinco regiones ($G \leq 0,05$) es muy pequeña. Exactamente ocurre lo mismo con la estructura espacial opuesta, siendo muy poco probable que bajo estas condiciones del mercado la industria termine concentrada en una única región.

Las probabilidades de mayores índices de aglomeración van creciendo con θ , de tal forma que cuando el grado de competitividad en el mercado es muy grande ($\theta = 0,7$), la industria tiende preferentemente a un estado de máxima aglomeración espacial, donde una de las cinco regiones alberga la casi totalidad de las empresas. La naturaleza no ergódica del modelo impide conocer a priori en cuál de las cinco regiones se concentrará la industria.

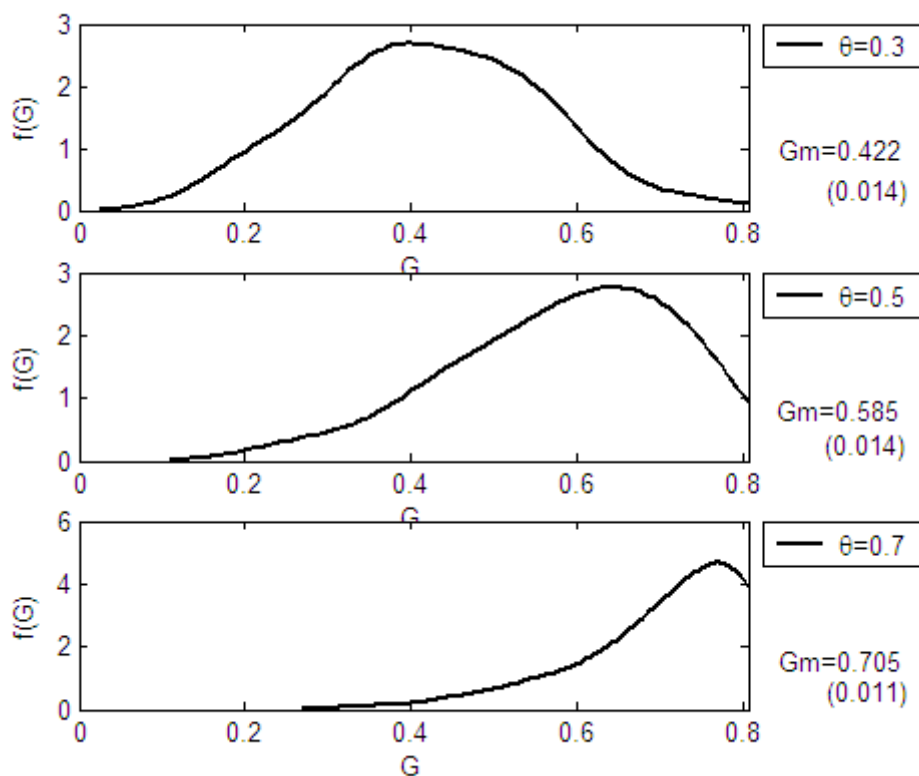


Figura 50. Estimación kernel de la función de distribución del coeficiente de Gini en el largo plazo $t = 300$ cuando en la industria existen cinco regiones para diferentes valores de θ .

5.5 Knowledge Spillovers

Nuestro modelo se ha construido sobre la hipótesis de que la innovación, en todas sus formas, constituye el motor de cambio y crecimiento de las empresas y las regiones. Los procesos de innovación fueron modelados teniendo en cuenta no sólo los efectos de las economías de escala en las actividades de I+D de las empresas, sino también de las externalidades de conocimiento que pueden darse por el hecho de desarrollar una actividad en proximidad con otras empresas de la industria.

Concretamente hemos tenido en cuenta dos tipos de externalidades: los genuinos knowledge spillovers (KS), externos a la empresa y por tanto no controlables por la misma; otras externalidades de conocimiento dentro de la empresa, que sabe aprovechar las posibilidades de recombinación de conocimiento de su diversidad de divisiones productivas, y que llamamos simplemente externalidades de conocimiento de empresa. Ambos efectos están controlados por los parámetros $\beta^{región}$ y $\beta^{empresa}$, respectivamente.

5.5.1 Efecto de los knowledge spillovers en la concentración y la aglomeración industrial

Para analizar el efecto de este tipo de externalidades en los procesos de innovación, y consecuentemente en los fenómenos de aglomeración y concentración industrial, hemos realizado un análisis de sensibilidad de estos parámetros dentro del rango de posibles valores¹⁵³ para un escenario bi-regional, núcleo-periferia.

La Figura 51 muestra un gráfico de superficie (*contour plot*) que permite visualizar mediante un gradiente de colores los valores promedio del índice de Herfindahl que alcanza la industria en el largo plazo. Bajo las suposiciones de nuestro modelo, en cuanto que los efectos de los knowledge spillovers no pueden ser superiores a las externalidades internas de una empresa¹⁵⁴ ($\beta^{región} \leq \beta^{empresa}$), únicamente utilizamos en nuestro análisis la superficie triangular derecha a la diagonal del cuadrado ($\beta^{región} = \beta^{empresa}$). La intersección de los valores ($\beta^{región} = 0,1; \beta^{empresa} = 0,4$) representa el punto en torno al cual hemos estudiado el comportamiento del modelo en los escenarios de simulación anteriores.

Una forma sencilla de interpretar estos gráficos de superficie es considerar un valor de uno de los parámetros, por ejemplo el de $\beta^{empresa} = 0,4$, y ver qué ocurre si aumentamos el valor del otro, en este caso $\beta^{región}$. De esta forma podemos cuantificar el efecto (en el largo plazo) de los knowledge spillovers ($\beta^{región}$) en el nivel de concentración industrial que alcanza la industria.

Los dos gráficos de superficie de la Figura 51 nos permiten constatar algo ya observado en las simulaciones anteriores: la sensibilidad del grado de concentración de la industria a las características del mercado de competencia monopolística. Así, cuando la presión de la selección entre variedades de productos es débil ($\theta = 0,3$), el índice de

¹⁵³ Recordemos las suposiciones que hicimos en el capítulo anterior cuando describimos la ecuación que gobierna el esfuerzo efectivo en I+D de cada empresa. Decíamos que el efecto de las externalidades de conocimiento no podía ser significativamente muy grande en comparación con el gasto individual en I+D de una empresa $\{\beta^{región}, \beta^{empresa}\} \ll 1$.

¹⁵⁴ De lo contrario estaríamos afirmando que las divisiones de las empresas competidoras se benefician más del conocimiento de una empresa que las propias.

Herfindahl, que muestra la barra vertical del gráfico superior de la Figura 51, varía sobre un rango de valores pequeños $(0;0,2)$; mientras que cuando la selección entre variedades es más fuerte $(\theta=0,7)$, el índice de Herfindahl, gráfico inferior de la Figura 51, varía sobre un rango mayor $(0,15;0,6)$.

En cuanto a los KS, observamos que el efecto de éstos sobre el índice de Herfindahl depende del nivel de competitividad entre variedades de productos en el mercado. En general podemos afirmar que el aumento de la importancia de los KS, controlado por el parámetro $\beta^{región}$, tiende a disminuir la concentración industrial. Este hecho responde al efecto de la *difusión de conocimiento*, por el que la empresa líder pierde parte de su ventaja que se derrama en forma de conocimientos sobre las empresas próximas a ella, limitando sus posibilidades de monopolizar el mercado.

No nos ha de extrañar que este efecto negativo de la difusión de conocimiento es más importante cuando la industria muestra una tendencia natural a la concentración, que cuando no. Así, en un escenario de competitividad en el mercado reducida $(\theta=0,3)$, observamos en el gráfico superior de la Figura 51 que partiendo de una posición con $\beta^{empresa} = 0,4$ la disminución en los niveles de concentración conforme incrementamos $\beta^{región}$ no es muy importante. Sin embargo, en el escenario opuesto con una alta competitividad en el mercado $(\theta=0,7)$, gráfico inferior de la Figura 51, la misma senda de incremento de $\beta^{región}$ introduce importantes disminuciones en el índice de concentración que alcanza la industria.

Podemos concluir diciendo que los KS introducen una limitación a cualquier proceso de concentración en la industria, y que este efecto se hace más acentuado cuando las condiciones del mercado favorecen la concentración industrial, como es el caso cuando las preferencias de los consumidores por la variedad de productos son pequeñas.

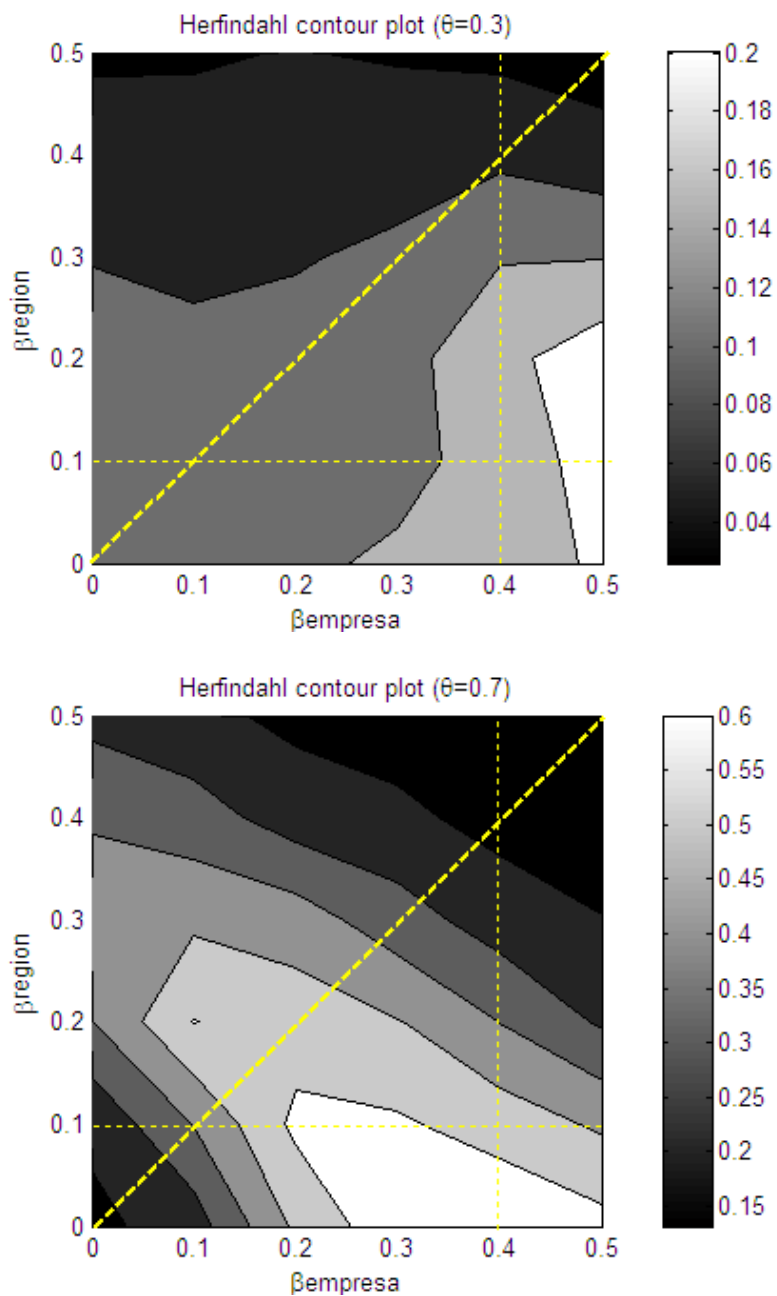


Figura 51. Contour plot del índice de Herfindahl en el largo plazo cuando variamos simultáneamente los parámetros $(\beta^{\text{empresa}}, \beta^{\text{región}})$ en un escenario con dos regiones.

Análogamente, para analizar el efecto de los KS sobre la aglomeración industrial, hemos elaborado un gráfico de superficie para el coeficiente de Gini de la industria en el largo plazo, que se muestra en la Figura 52.

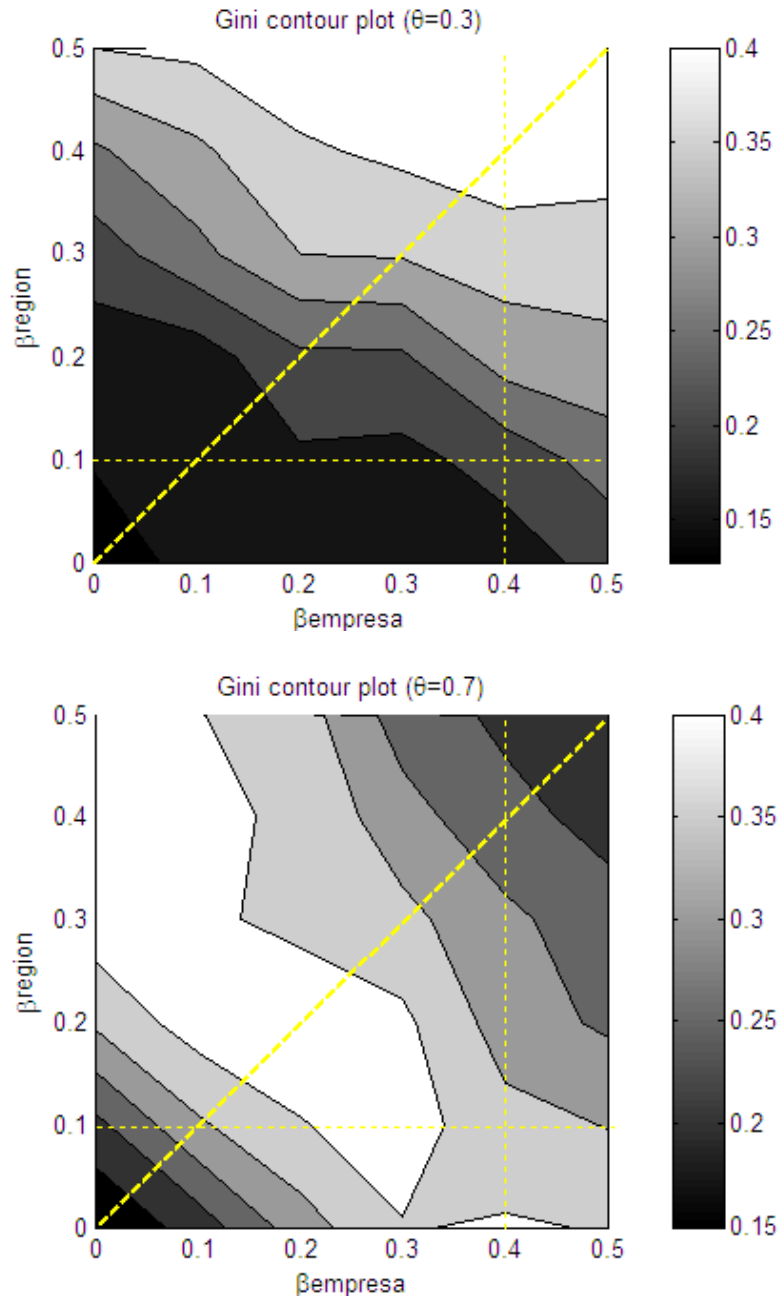


Figura 52. Contour plot del coeficiente de Gini en el largo plazo cuando variamos simultáneamente los parámetros $(\beta^{\text{empresa}}, \beta^{\text{región}})$ en un escenario con dos regiones.

En este caso, la influencia de los KS en la dinámica de aglomeración espacial de la industria es muy diferente. Vamos a ver que el aumento de la importancia de los KS en las regiones tiene un efecto opuesto dependiendo de las características del mercado: para bajos niveles de competitividad entre variedades en el mercado ($\theta = 0,3$), los KS

tienden a favorecer los procesos de aglomeración, mientras que para altos niveles de competitividad en el mercado ($\theta = 0,7$) los KS tienden a limitarlos.

Este hecho se puede observar en la Figura 52. Suponiendo una industria con $\beta^{empresa} = 0,4$, un incremento en $\beta^{región}$, y consecuentemente en la importancia de los KS, conlleva en un escenario de baja competitividad ($\theta = 0,3$) un aumento en el coeficiente de aglomeración de Gini; mientras que en el escenario opuesto, con una alta competitividad en el mercado ($\theta = 0,7$), se produce siempre una disminución.

Para explicar este fenómeno debemos tener en cuenta las suposiciones de nuestro modelo, y el comportamiento de la industria que hemos descrito hasta el momento. Una alta competitividad entre variedades ($\theta = 0,7$), fruto de una escasa preferencia de los consumidores por la variedad, favorece una industria con un elevado índice de concentración y un número reducido de empresas. Bajo las hipótesis de nuestro modelo, una alta concentración está relacionada siempre con una elevada aglomeración espacial, en tanto que una empresa y sus divisiones productivas se localizan en la misma región. En este escenario, los KS tienden a frenar la tendencia a la concentración industrial y espacial, en la medida en que estimulan los procesos de innovación de grupos de pequeñas empresas situadas en la otra región, y consecuentemente su capacidad para competir con éxito en el mercado.

Una baja competitividad entre variedades en el mercado ($\theta = 0,3$) permite el desarrollo de una industria menos concentrada y con un mayor número de empresas –cualquier variedad de producto es aceptada positivamente por los consumidores, teniendo muchas posibilidades de mantenerse en el mercado–. Cuando los KS son poco significativos, la industria se encuentra muy repartida entre las dos regiones. Sin embargo, cuando estos son más importantes favorecen la expansión de aquella región con más actividad innovadora, que termina por acoger la mayor parte de la industria.

Podemos concluir diciendo que los KS tienden a empujar en la dirección opuesta a la tendencia natural de la dinámica espacial de la industria. Así por ejemplo, en un escenario de mayor diversidad empresarial porque el mercado favorece la variedad ($\theta = 0,3$), los KS empujan en contra de la tendencia a la dispersión espacial. Sin

embargo, en un escenario de menor diversidad empresarial porque el mercado no aprecia la variedad ($\theta = 0,7$), los KS empujan en contra de la tendencia natural a la aglomeración espacial favorecida por la concentración de la industria en pocas empresas.

5.5.2 Regiones con diferentes knowledge spillovers

En el apartado anterior hemos analizado la influencia de los knowledge spillovers en la concentración y aglomeración industrial, mediante un escenario de simulación con dos regiones en el que variábamos los parámetros $\beta^{región}$ y $\beta^{empresa}$, aunque siendo iguales para ambas. Ahora vamos a proponer un escenario diferente, con el objeto de estudiar el efecto de los KS cuando su importancia es distinta en cada región.

Hasta el momento habíamos considerado que la diversidad estaba únicamente en las empresas, que diferían en sus características y capacidades. Las regiones eran diferentes en la medida en que albergaban a grupos de empresas distintas. Ahora, incorporamos una diversidad propia de las regiones, al suponer que los factores que condicionan los KS son distintos en cada región.

Definimos una industria repartida entre dos regiones, en la que la importancia de las externalidades de conocimiento dentro de las empresas es constante e igual a $\beta^{empresa} = 0,4$, y en la que el peso de los KS varía de forma diferente para cada región. Bajo estas suposiciones es posible llevar a cabo un análisis de sensibilidad semejante al efectuado anteriormente, donde los parámetros de estudio son las respectivas importancias de los KS en cada región: $\beta^{región1}$ y $\beta^{región2}$.

La Figura 53 muestra dos gráficos de superficie con el correspondiente gradiente de colores para el coeficiente de Gini que alcanza la industria en el largo plazo. Salvo por errores de muestreo, en los dos gráficos se observa una simetría de colores en torno a la recta $\beta^{región1} = \beta^{región2}$, pues el valor de Gini es indiferente al orden de la combinación de los parámetros $(\beta^{región1}, \beta^{región2})$.

Los gráficos superior e inferior de la Figura 53 representan un escenario con bajo y alto nivel de competitividad entre variedades en el mercado, respectivamente. En ambos casos, los valores de la diagonal $\beta^{región1} = \beta^{región2}$ nos muestran resultados equivalentes a los ya comentados en el apartado anterior: cuando $\theta = 0,3$ los KS favorecen la aglomeración industrial, y cuando $\theta = 0,7$ la limitan.

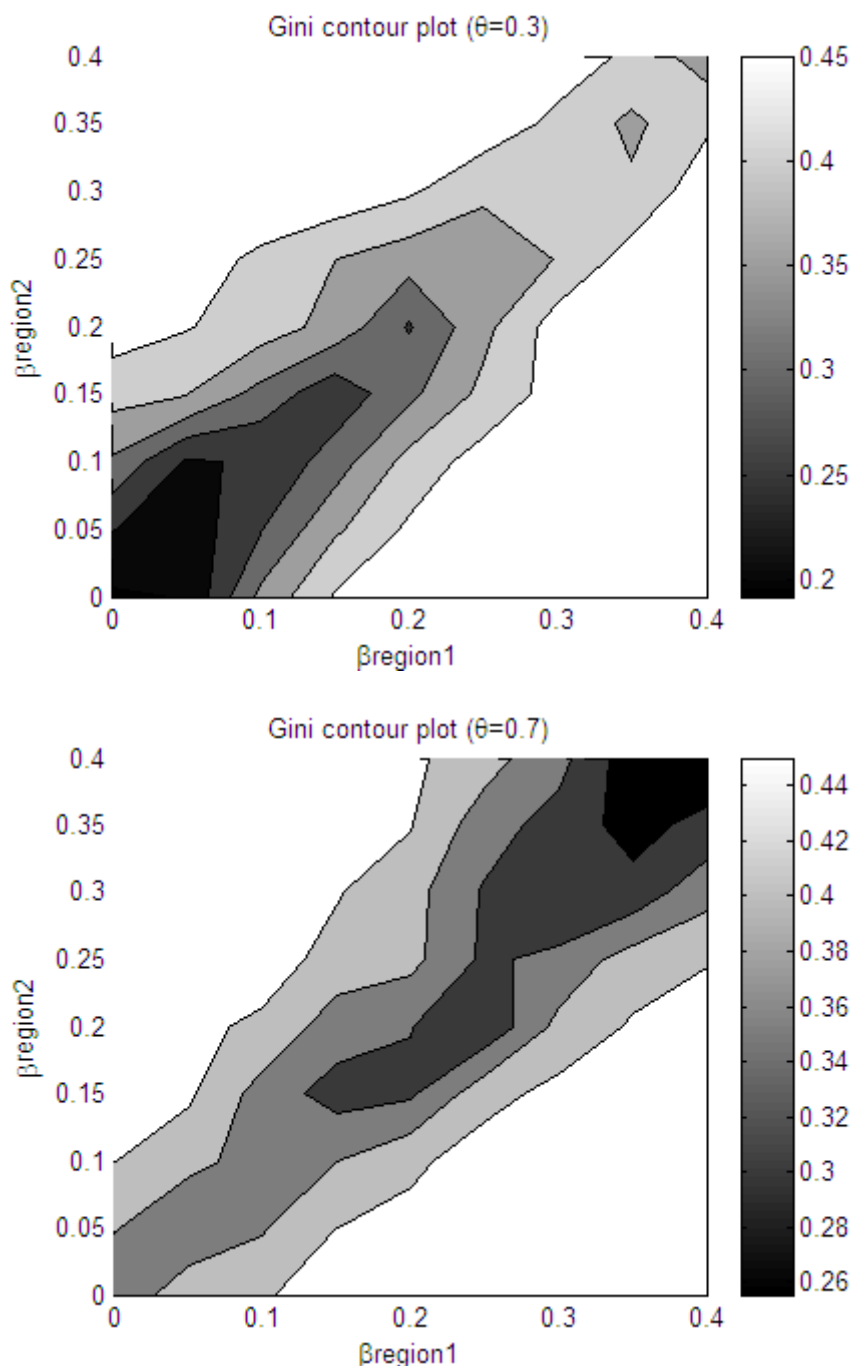


Figura 53. Contour plot del coeficiente de Gini en el largo plazo cuando variamos simultáneamente los parámetros $\beta^{región}$ de dos regiones.

Alejarnos de la diagonal para cualquier valor de $\beta^{región}$ significa que en una de las regiones el efecto de los KS sobre los procesos de innovación de las empresas es significativamente mayor que en la otra. Cuando esto ocurre, una asimetría en los KS favorece la aglomeración de la industria en una de las regiones, independientemente de las características del mercado (observar las áreas blancas a izquierda y derecha de la diagonal en los dos gráficos de la Figura 53). Para desviaciones intermedias entre $\beta^{región1}$ y $\beta^{región2}$ obtenemos grados de aglomeración intermedios (áreas de color gris) dependiendo del efecto de los KS en cada uno de los dos escenarios de competitividad del mercado.

Queda por saber cuál de las dos regiones, que difieren en sus $\beta^{región}$, es la que alcanza mayores ratios de aglomeración industrial. Intuitivamente, si tenemos en cuenta las hipótesis de nuestro modelo, podemos pensar que aquella región con mayor $\beta^{región}$ tendrá más posibilidades de hacerse con la industria. Para mostrar esto, hemos definido una *ratio de asimetría entre las rentas* de cada región de la siguiente forma:

$$\rho_Y(t) = \frac{Y_r^{\max\beta}(t) - Y_r^{\min\beta}(t)}{Y_r^{\max\beta}(t) + Y_r^{\min\beta}(t)} \quad (5.26)$$

donde $Y_r^{\max\beta}(t)$ representa la renta de aquella región con un $\beta^{región}$ mayor, e $Y_r^{\min\beta}(t)$ la renta de la región con menor $\beta^{región}$. Este ratio varía entre $(-1;1)$, tomando valores positivos cuando la región con más $\beta^{región}$ se hace con una mayor renta que su competidora, y valores negativos en caso contrario.

La Figura 54 muestra otro par de gráficos de superficie del ratio de asimetría de la renta entre regiones que alcanza la industria en el largo plazo, para los dos conocidos escenarios de mercado. Lo primero que destaca en los dos gráficos es que una diferencia significativa entre los $\beta^{región}$, valores alejados de la diagonal $\beta^{región1} = \beta^{región2}$, trae consigo que la región con mayor parámetro, y por tanto con KS más importantes, se quede con cerca del 90% de la renta de la industria ($\rho_Y = 0,8$).

Si las diferencias entre las dos regiones son poco importantes (valores próximos a la diagonal $\beta^{región1} = \beta^{región2}$), la asimetría en las rentas no se ve influida por las mismas. Cuando esto ocurre, el ratio ρ_Y toma unas veces valores positivos y otras negativos, estando su promedio muy próximo a cero (áreas oscuras de los gráficos de superficie). Evidentemente, la industria alcanzará un grado de aglomeración mayor o menor dependiendo de la importancia de los KS y de la competitividad en el mercado, como ya hemos explicado antes.

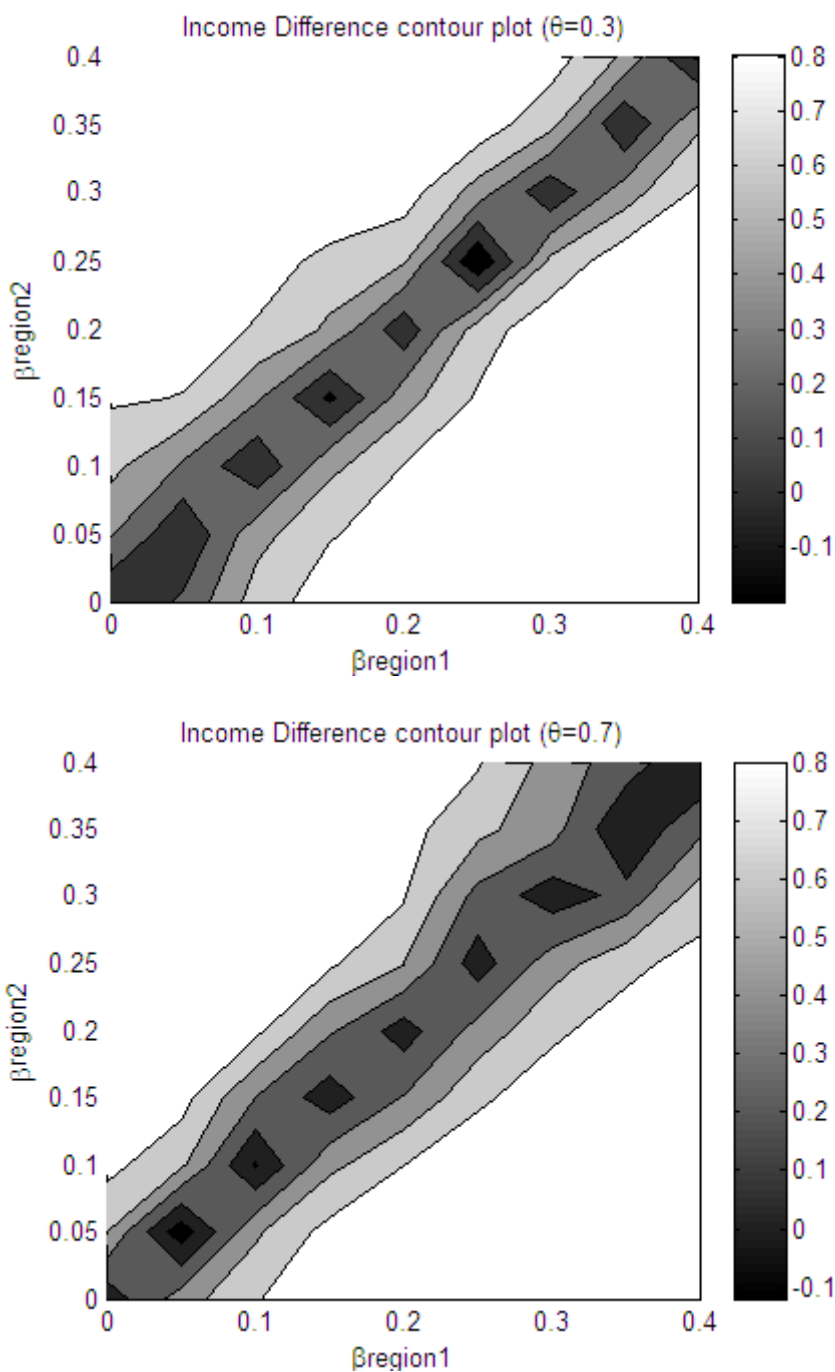


Figura 54. Contour plot del coeficiente de asimetría de la renta entre regiones en el largo plazo cuando variamos simultáneamente el parámetro $\beta^{región}$ de dos regiones.

Cuando $\beta^{región1} \approx \beta^{región2}$ la asimetría en las rentas no se ve determinada por la diferencia entre regiones. El ratio ρ_Y toma valores positivos y negativos con la misma probabilidad, estando su valor promedio muy próximo a cero.

5.5.3 Knowledge spillovers y política regional

El objetivo de esta tesis no persigue estudiar el efecto de las políticas regionales sobre la dinámica de aglomeración y concentración industrial, y por tanto cualquier tipo de inferencia a este respecto ha de tomarse con cierta cautela. No obstante, podemos extraer algunas conclusiones en base a los resultados obtenidos en los dos últimos apartados. Aunque no pueden considerarse como afirmaciones rotundas, sí aportan algunas pistas para una posible extensión de esta investigación.

Hemos constatado con nuestro modelo la importancia que juegan los procesos de selección del mercado de competencia monopolística en la aglomeración y concentración de la industria. Bajo la hipótesis de que las regiones disfrutan de knowledge spillovers de la misma intensidad, su efecto sobre la aglomeración espacial difiere según el grado de competitividad en la industria: en un mercado que favorece la variedad de productos los KS facilitan los procesos de aglomeración, mientras que en un mercado que no estima la variedad los limitan.

Desde el punto de vista individual de la empresa, este hecho podría tener diferentes interpretaciones. Así, una empresa que disfruta de un peso importante en la industria, sabedora de que posee un gran conocimiento, no tendría interés en que se incentive (por ejemplo mediante políticas regionales) la difusión de conocimiento entre empresas. Por el contrario, una empresa pequeña, conocedora de su limitado conocimiento en la industria, estaría muy interesada en mejorar estos procesos de difusión. Además, experimentaría el beneficio de estas externalidades de conocimiento, obteniendo ventajas competitivas frente a empresas situadas en otras regiones.

El análisis desde el punto de vista regional no ofrece, sin embargo, ninguna clase de dilema. Hemos visto que cuando las regiones difieren en sus capacidades de KS,

resultan siempre beneficiadas aquellas que disfrutan de mayores externalidades de conocimiento, en tanto que en el largo plazo consiguen absorber la mayor parte de la actividad industrial. Teniendo esto en cuenta, no nos extraña que en la agenda política de muchas regiones estén siempre presentes temas relacionados con la difusión y transmisión de conocimiento como un instrumento de desarrollo económico.

5.6 Discusión

En este capítulo hemos analizado mediante simulación computacional el modelo de industria innovadora y diferenciada propuesto. Un modelo evolucionista construido sobre dos grandes hipótesis: los procesos de selección en la industria se desarrollan a través de la competencia monopolística entre productos cuasi-sustitutos, y los knowledge spillovers localizadas en cada región condicionan positivamente la actividad innovadora de las empresas.

Sobre los resultados de este capítulo hemos fundamentado las conclusiones principales de esta tesis que resumiremos en el próximo capítulo. Así, hemos comprobado que nuestro modelo es capaz de reproducir algunas regularidades que están presentes en los fenómenos reales como: la evolución del número de empresas en la industria, la evolución de la cuota de mercado de la empresa líder, el número de innovaciones a lo largo de la vida de la industria o la ley de potencia que describe la distribución del tamaño de las empresas.

También se ha puesto de manifiesto la importancia que los procesos de selección tienen en los fenómenos de aglomeración y concentración industrial. En general, podemos concluir que cuando la selección es débil, característico de mercados con poca competitividad entre variedades de productos, los niveles de concentración industrial y de aglomeración espacial son pequeños. Sin embargo, cuando los procesos de selección son importantes, siendo muy feroz la competitividad entre variedades en el mercado, la industria tiende de forma natural a elevados niveles de concentración industrial y de aglomeración espacial.

Por último hemos analizado con detalle el efecto de los knowledge spillovers en la concentración y aglomeración industrial. El efecto difusión de conocimiento trae siempre consigo una limitación a los procesos de concentración industrial, más o menos

significativa dependiendo de la tendencia natural del mercado a la concentración. Por el contrario, los KS muestran un efecto diferente en la dinámica espacial de la industria: cuando el mercado permite una gran variedad de productos, los KS favorecen la aglomeración industrial, y en el caso opuesto la limitan. En todos los casos, cuando la importancia de los KS es diferente entre regiones, aquellas con más externalidades de conocimiento muestran mayores niveles de aglomeración industrial.

5.7 Anexo: valor de los parámetros para las simulaciones propuestas

En las siguientes tablas se muestran los valores de los parámetros del modelo utilizados en todos los escenarios de simulación descritos en este capítulo.

Tabla 14. Configuración básica de los parámetros de la industria para todos los escenarios de simulación propuestos.

Renta inicial	$Y_{ini} = 1$
Renta máxima	$Y_{max} = 100$
Parámetro curva logística	$a = 20$
Parámetro curva logística	$b = 0,03$
Probabilidad spin-off	$p^{spinoff} = 0,1$
Distribución Poisson de entrada de nuevas empresas	$\lambda_{entrada} = 0,025$
Rendimiento mínimo	$x_{min} = 0,001$
Capital mínimo	$k_{min} = 0,6 (> k_f + k_d)$

Tabla 15. Configuración básica de los parámetros del proceso de innovación para todos los escenarios de simulación propuestos.

Importancia externalidades empresa	$\beta_{empresa} = 0,4$
Importancia externalidades región	$\beta_{región} = 0,1$
Probabilidad de innovación máxima	$P_{max}^{in} = 0,3$
Probabilidad de innovación mínima	$P_{min}^{in} = 0,01$
Productividad innovación nuevas variedades	$\alpha_{in}^{nv} = 0,00025$
Productividad innovación proceso	$\alpha_{in}^{pc} = 0,0005$
Productividad innovación producto	$\alpha_{in}^{pd} = 0,0005$
Variación probabilidad máxima de innovación de nuevas variedades	$d = 0,25$
Factor de escala función Cobb-Douglas esfuerzo I+D	$X_{escala} = 1000$

Tabla 16. Configuración básica de los parámetros de las empresas y divisiones para todos los escenarios de simulación propuestos.

Coste de capital	$c = 0,2$
Depreciación del capital	$\delta = 0,1$
Financiación	$b_f = 0$
Productividad inicial	$A_{ini} = 0,5$
Preferencia producto inicial	$f_{ini} = 1$
Capital inicial	$k_{ini} = 1$
Capital fijo empresa	$k_f = 0,5$
Capital fijo división	$k_d = 0,1$
Ratios gasto I+D inicial	$r_{ini}^{pc} = r_{ini}^{pd} = r_{ini}^{nv} = 0,02$
Memoria (adaptación rendimiento)	$\phi_x = 0,8$
Memoria (adaptación gasto en I+D)	$\phi_r = 0,8$
Crecimiento máximo innovación proceso	$\gamma_{pc} = 0,05$
Refuerzo (adaptación gasto en I+D)	$\delta_{refuerzo} = 0,01$
Coeficiente variación (imitación con error)	$\frac{\sigma_e}{\mu} = 0,1$

Conclusiones

Principales conclusiones de la tesis

El trabajo de investigación que hemos llevado a cabo nos ha permitido cumplir con el objetivo principal de esta tesis: *diseñar, implementar y analizar un modelo evolucionista de dinámica industrial que contribuya a comprender mejor los fenómenos de aglomeración y concentración industrial.*

Para alcanzar este objetivo hemos tenido que recorrer una serie de etapas, recogidas en los correspondientes capítulos, siguiendo una línea de acción coherente y consecuente con dicho objetivo:

- Primero hemos revisado la literatura científica sobre fenómenos de aglomeración y concentración industrial, prestando especial atención a aquellas aportaciones formales, analíticas o algorítmicas, como el modelo propuesto por la Nueva Geografía Económica o la familia de modelos de dinámica industrial desarrollados por la Economía Evolucionista.
- También hemos revisado la metodología más idónea para el estudio de este tipo de problemas complejos, que sin lugar a dudas constituye el Modelado Basado en Agentes.
- Utilizando el marco evolucionista hemos definido los principios teóricos que, en nuestra opinión, permiten explicar muchos de los fenómenos de aglomeración y concentración industrial, integrando la explicación evolucionista del fenómeno económico con otras interesantes aportaciones sobre los procesos de innovación y los knowledge spillovers provenientes de la Geografía de la Innovación.

- Después, hemos definido un modelo evolucionista de una industria innovadora y diferenciada, en la que la innovación, las externalidades de conocimiento y las características del mercado que impulsa los procesos de selección ocupan un lugar preferente.
- Hemos validado nuestro modelo comprobando que reproduce importantes regularidades (*stylized facts*) presentes en muchas industrias.
- Finalmente, hemos estudiado mediante simulación computacional cómo emergen fenómenos de concentración y aglomeración industrial, y su dependencia de los procesos de selección –expresión del mercado de competencia monopolística que definen las preferencias de los consumidores por la variedad–, y de los procesos de desarrollo –innovaciones que ocurren en condiciones de incertidumbre, condicionadas por las externalidades de conocimiento dentro de la empresa y los knowledge spillovers localizados en cada región–.

Las principales conclusiones de esta tesis se pueden agrupar en dos grandes apartados: uno referente al dominio de aplicación y otro al metodológico.

Fenómenos de aglomeración y concentración industrial

1. Los fenómenos de aglomeración y concentración industrial pueden explicarse a partir de los procesos de selección y de desarrollo.

Hemos definido una cadena causal, que llamamos *causalidad acumulativa*, que en nuestra opinión explica la dinámica de aglomeración y concentración de muchas industrias: mediante la innovación las empresas no sólo obtienen ventajas competitivas, sino que expanden su actividad fabricando nuevas variedades de producto; el crecimiento de las empresas conlleva consecuentemente el crecimiento de la región donde están localizadas, acentuando las economías de escala y las externalidades de conocimiento que refuerzan positivamente la innovación. El modelo evolucionista de industria innovadora y diferenciada propuesto demuestra que esta causalidad acumulativa es suficiente para explicar fenómenos de aglomeración y concentración industrial.

2. Los fenómenos de aglomeración industrial no son sólo una cuestión del tamaño del mercado local y la importancia de los costes de transporte como defiende la Nueva Geografía Económica.

Nuestro modelo plantea un escenario de una industria donde las empresas venden en un mercado global, y los costes de transporte no influyen en los precios de las variedades de productos. Sin embargo, bajo las hipótesis de nuestro modelo, los procesos de selección y de innovación conducen a estados de aglomeración industrial, donde unas pocas regiones acogen la mayor parte de la industria.

3. La incorporación del concepto de competencia monopolística en los modelos evolucionistas de dinámica industrial contribuye a una mejor explicación de los fenómenos de concentración industrial.

La suposición contemplada en muchos modelos evolucionistas de dinámica industrial de un mercado con un único producto homogéneo suele estar bastante alejada de la realidad de las industrias. Lo cierto es que muchas industrias se caracterizan por un mercado con una significativa variedad de productos, donde conseguir una posición de monopolio resulta mucho más complicada por la tendencia de los consumidores a distinguir imperfectamente entre productos y empresas. Aun así, nuestro modelo nos enseña que es posible alcanzar importantes estados de concentración industrial en el que unas pocas empresas fabrican la mayoría de las variedades de productos.

4. Los procesos de selección que determinan las características del mercado de competencia monopolística influyen significativamente en la dinámica de concentración y aglomeración industrial.

Las preferencias de los consumidores por la variedad determinan la presión de selección del mercado sobre las empresas de la industria. Cuando los consumidores muestran una escasa preferencia por la variedad, la selección es muy fuerte y la industria se caracteriza por una gran concentración industrial y un número pequeño de empresas. En cambio, cuando la preferencia por la variedad es mayor, la selección es más débil y la industria exhibe menores niveles de concentración y un mayor número de empresas. En general, una elevada

concentración industrial está relacionada con una importante aglomeración espacial.

5. Los *knowledge spillovers* tienden a reducir los niveles de concentración industrial (efecto difusión de conocimiento).

El aumento de la importancia de los *knowledge spillovers* tiende a disminuir la concentración industrial. Esto se debe a que la empresa líder pierde parte de su ventaja competitiva que se derrama en forma de conocimientos sobre las empresas próximas a ella, limitando sus posibilidades de monopolizar el mercado. Este efecto negativo sobre la concentración se acentúa en mercados con poca preferencia por la variedad, que muestran una tendencia natural a la concentración, ya que el efecto de la difusión es más significativo al actuar sobre un conocimiento muy concentrado en pocas empresas.

6. Los *knowledge spillovers* influyen significativamente en la dinámica espacial de la industria.

Cuando las regiones disfrutan de *knowledge spillovers* de la misma intensidad, su efecto sobre la aglomeración espacial difiere según el grado de competitividad en la industria. En industrias con mayor diversidad empresarial los *knowledge spillovers* limitan la tendencia a la dispersión espacial. Por el contrario, en industrias con poca diversidad de empresas los *knowledge spillovers* limitan la tendencia a la aglomeración espacial que sucede con la concentración de la industria en pocas empresas.

Cuando las regiones difieren significativamente en los efectos de los *knowledge spillovers* sobre los procesos de innovación de las empresas, aquellas regiones con más externalidades de conocimiento muestran siempre mayores niveles de aglomeración industrial.

7. La naturaleza evolutiva de los fenómenos de aglomeración y concentración industrial muestra una gran *dependencia de la historia* que hace imposible determinar a priori el estado final de una industria.

La no ergodicidad de estos sistemas tiene importantes implicaciones desde el punto de vista normativo. Nuestro modelo nos enseña que no podemos determinar con exactitud qué regiones acogerán la mayor parte de la industria o qué empresas alcanzarán una posición de liderazgo en el mercado. Lo único que podemos estimar son las probabilidades de que algo de esto ocurra, o estudiar cómo determinadas características y comportamientos de las empresas influyen en la evolución final de la industria.

Modelado Basado en Agentes y Geografía Económica

8. El Modelado Basado en Agentes permite desarrollar una investigación *bottom-up* mucho más adecuada al estudio de problemas complejos como los fenómenos de aglomeración y concentración industrial.

No hay duda de que la Geografía Económica aborda problemas muy complejos, en tanto que ha de tener en cuenta una gran diversidad de factores no sólo económicos, sino también geográficos, sociales, culturales e históricos. El Modelado Basado en Agentes hace posible un estudio muy natural de estos problemas, pues facilita una traducción directa de los diferentes elementos que componen un fenómeno observado a las entidades computacionales que conforman su modelo representativo. La formalización mediante este tipo de modelos computacionales es muy importante, ya que nos permite dar el salto de aproximaciones teóricas a descripciones completas de los fenómenos, y de esta forma profundizar en el conocimiento sobre los diferentes procesos que se esconden detrás de los problemas económico-espaciales.

9. El Modelado Basado en Agentes ofrece un punto de encuentro que facilita el diálogo interdisciplinario entre áreas científicas diversas.

El marco puramente analítico utilizado generalmente en la Economía suele imponer importantes simplificaciones sobre los fenómenos observados. Sin embargo, el Modelado Basado en Agentes hace posible un proceso de modelado más fiel a la realidad, por cuanto recoge con más detalle las características de las

partes que lo integran, y en el que es posible un diálogo positivo entre disciplinas científicas heterogéneas.

Líneas de investigación futuras

El modelo que hemos planteado en esta tesis, si bien constituye un avance con respecto a otras aproximaciones evolucionistas a la dinámica industrial, contiene importantes simplificaciones que han sido necesarias para poder realizar un análisis e interpretación precisa de los resultados. Sobre la base de este trabajo, resulta posible extender la investigación considerando nuevas hipótesis sobre los fenómenos de aglomeración y concentración industrial. Si bien, estas extensiones deben hacerse dentro del marco evolucionista que venimos defendiendo, tratando de integrar las nuevas aportaciones con los principios de la Economía Evolucionista.

En una primera línea de trabajo futura pretendemos incorporar la diversidad propia del nivel regional. En nuestro modelo las regiones mantienen una cierta neutralidad en los procesos evolutivos de la industria (por ejemplo, el efecto de los knowledge spillovers tiene la misma importancia en todas las regiones) para centrar el detalle del modelado en el nivel de las empresas que difieren en capacidades y comportamientos. Sin embargo, es evidente que existen otros factores diferenciadores propios de las regiones, más allá de las particularidades individuales de las organizaciones, que condicionan los procesos de selección y de desarrollo de la industria. Así, nos parece especialmente interesante profundizar en la naturaleza de los fenómenos de knowledge spillovers, su dependencia de factores geográficos e institucionales (como la existencia de universidades y centros tecnológicos, o las políticas regionales sobre transferencias de la investigación y la tecnología), y su vinculación con los diferentes procesos de innovación que desarrollan las empresas. Esta línea de investigación resulta especialmente interesante, por cuanto nos permitiría inferir algunas conclusiones sobre políticas regionales de desarrollo, un tema de gran interés para los gobiernos locales y regionales. Aunque no debemos olvidar que la complejidad de este tipo de fenómenos nos invita siempre a ser prudentes a la hora de proponer modelos de estudio muy ambiciosos.

Una segunda extensión de nuestro modelo tiene como objetivo ampliar la dimensión de los consumidores. Hemos defendido que la suposición de un mercado de competencia monopolística es la más próxima a los fenómenos económicos reales, y en la medida en que determina los procesos de selección, juega un papel esencial en la dinámica evolutiva de la industria. Sin embargo, desarrollar con más detalle el comportamiento de los consumidores no resulta trivial. Por ejemplo, introduce inevitablemente una dimensión estratégica en el comportamiento de las empresas a la hora de tomar sus decisiones sobre precios y cantidades, que gracias a la aproximación de competencia monopolística de Dixit-Stiglitz hemos evitado en el modelo.

Por último, proponemos una línea de trabajo empírica que estudie con detalle las relaciones entre los diferentes resultados teóricos obtenidos de nuestro modelo y los fenómenos reales económico-espaciales. El modelo evolucionista propuesto en esta tesis reproduce algunas regularidades observadas en la dinámica de las industrias. Pero además, nos muestra otros comportamientos emergentes que pueden servir de pista para esta investigación empírica. Entre otras cosas, nos parece interesante profundizar en la relación entre los procesos de selección, característicos de mercados con mayor o menor variedad de productos industriales, y los correspondientes fenómenos de aglomeración y concentración industrial.

Referencias

- Aguilera, A. & López-Paredes, A. (2001). *Modelado multiagente de sistemas socioeconómicos: una introducción al uso de la inteligencia artificial en la investigación social*. San Luis Potosí: El Colegio de San Luis.
- Albayrak, S. & Garijo, F. J. (1998). *Intelligent Agents for Telecommunication Applications, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1437*. Berlin: Springer-Verlag.
- Alchian, A. A. (1950). Uncertainty, Evolution and Economic Theory. *Journal of Political Economy*, 58: 211-222.
- Alonso, W. (1964). *Location and land use: toward a general theory of land rent*. Cambridge: Harvard University Press.
- Andersen, E. S. (1996). The Nelson and Winter Models Revisited: Prototypes for Computer-Based Reconstruction of Schumpeterian Competition. DRUID working paper 96-2 Danish Research Unit for Industrial Dynamic.
- Andersen, E. S. & Valente, M. (2002). Introduction to Artificial Evolutionary Processes. Introduction to Artificial Evolutionary Processes. Draft chapter for the book project on Artificial Economic Evolution: Model Exploration and Extension in the Laboratory for Simulation Development.
- Andersen, E. S. (1994). *Evolutionary economics. Post-Schumpeterian contributions*. London: Pinter Publishers.
- Arauzo, J. A., Benito, J. J. & del Olmo, R. (2003). El Control de Planta: Una Solución Basada en Agentes. En J. J. Benito & A. Redondo (Eds), *Actas del Congreso de Ingeniería de Organización 2003*: V.S. Merino.
- Arauzo, J. A., Benito, J. J., del Olmo, R. & Sanz, P. (2006). Diseño de subastas para la programación job shop. *X Congreso de Ingeniería de Organización*. Valencia: ADINGOR.
- Arauzo, J. A., Benito, J. J., del Olmo, R. & Sanz, P. (2004a). Situación actual y expectativas de los sistemas de fabricación basados en agentes. *Actas del VIII Congreso de Ingeniería de Organización*: 1043-1052. Leganés: ADINGOR.
- Arauzo, J. A., Benito, J. J., Sanz, P. & del Olmo, R. (2005). Propuesta de un sistema de programación y control distribuido para sistemas de fabricación tipo Job Shop. En D. de la Fuente (Eds), *IX Congreso de Ingeniería de Organización*: 174-175. Oviedo: ADINGOR.
- Arauzo, J. A., De Benito, J. J. & del Olmo, R. (2004b). Diseño e implantación de un sistema multiagente para el control de sistemas de fabricación tipo job shop. *V Workshop en Agentes Físicos*. Girona
- Arauzo, J. A., De Benito, J. J., del Olmo, R. & Sanz, P. (2004c). A multiagent system for job shop manufacturing control. *Image Processing, Biomedicine, Multimedia, Financial Engineering and Manufacturing - Proceedings of the Sixth Biannual World Automation Congress*: 485-490
- Arauzo, J. A., De Benito, J. J., Sanz, P. & del Olmo, R. (2004d). Modelling shop floor control as multi agent system. *Decision and Simulation in Engineering and Management Science - International Conference on Modelling and Simulation, ICMS'04*: 19-20
- Arrow, K. (1962). The Economic Implications of Learning by Doing. *Review of Economic Studies*, 29: 155-173.

- Arthur, W. B. (1989). Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-in by Historical Events. *Economic Journal*, 99(394): 116-131.
- Arthur, W. B. (1995). Complexity in Economic and Financial Markets. *Complexity*, 1: 20-25.
- Arthur, W. B. (1994). *Increasing returns and path dependence in the economy*. Ann Arbor: The University of Michigan Press.
- Arthur, W. B. (2006). Chapter 32 Out-of-Equilibrium Economics and Agent-Based Modeling. En L. Tesfatsion & K. L. Judd (Eds), *Handbook of Computational Economics*, Volume 2 edn: 1551-1564: Elsevier.
- Audretsch, D. B. & Feldman, M. P. (1996). R&D Spillovers and the Geography of Innovation and Production. *American Economic Review*, 86(3): 630-640.
- Axelrod, R. M. (1997a). Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences. En R. Conte, R. Hegselmann & P. Terna (Eds), *Simulating Social Phenomena, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 456*: 21-40. Berlin: Springer-Verlag.
- Axelrod, R. M. (1997b). *The complexity of cooperation: agent-based models of conflict and cooperation*. Princeton: The Princeton University Press.
- Axelrod, R. (2006). Chapter 33 Agent-based Modeling as a Bridge Between Disciplines. En L. Tesfatsion & K. L. Judd (Eds), *Handbook of Computational Economics*, Volume 2 edn: 1565-1584: Elsevier.
- Axtell, R. (2001). Zipf Distribution of U.S. Firm Sizes. *Science*, 293(5536): 1818-1820.
- Axtell, R. (1999). The Emergence of Firms in a Population of Agents: Local Increasing Returns, Unstable Nash Equilibria, and Power Law Size Distributions. *Working Paper 3*: Brookings Institution.
- Axtell, R. L. (2000). Why Agents? On the Varied Motivations for Agent Computing in the Social Sciences. En C. M. Macal & D. Sallach (Eds), *Proceedings of the Workshop on Agent Simulation: Applications, Models, and Tools*: 3-24: Argonne National Laboratory.
- Axtell, R. L., Epstein, J. M. & Young, H. P. (2000). The Emergence of Classes in a Multi-Agent Bargaining Model. *Working Papers 9*: Brookings Institution.
- Baptista, R. & Swann, P. (1998a). Do firms in clusters innovate more? *Research Policy*, 27(5): 525-540.
- Baptista, R. & Swann, P. (1998b). Do firms in clusters innovate more? *Research Policy*, 27(5): 525-540.
- Barro, R. J. & Martin, X. (1995). *Economic growth*. New York: McGraw-Hill.
- Becattini, G. (1990b). The Marshallian industrial districts as a socio-economic notion. *Industrial districts and inter-firm co-operation in Italy*: 37-51. Genova: International Institute for Labour Studies.
- Becattini, G. (1990a). The Marshallian industrial districts as a socio-economic notion. *Industrial districts and inter-firm co-operation in Italy*: 37-51. Genova: International Institute for Labour Studies.
- Benito, J. J., Arauzo, J. A., del Olmo, R. & Sanz, P. (2005). Los sistemas multi-agentes en la formación de empresas virtuales dinámicas. En D. de la Fuente (Eds), *IX Congreso de Ingeniería de Organización*: 107-108. Oviedo: ADINGOR.
- Boschma, R. A. (2004). Competitiveness of regions from an evolutionary perspective. *Regional Studies*, 38(9): 1001-1014.
- Boschma, R. A. & Frenken, K. (2006b). Why is economic geography not an evolutionary science? Towards an evolutionary economic geography. *Journal of Economic Geography*, 6(3): 273-302.

- Boschma, R. A. & Frenken, K. (2006a). Applications of Evolutionary Economic Geography. DRUID Working Paper 06-26 Danish Research Unit for Industrial Dynamics.
- Boschma, R. A. & Lambooy, J. G. (1999). Evolutionary economics and economic geography. *Journal of Evolutionary Economics*, 9(4): 411-429.
- Bowman, A. W. & Azzalini, A. (1997). *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis*. Oxford University Press.
- Brakman, S. & Heijdra, B. J. (2004). *The monopolistic competition revolution in retrospect*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bratley, P., Fox, B. & Schrage, L. (1987). *A Guide to Simulation*. New York: Springer-Verla.
- Brenner, T. (2001). Simulating the evolution of localised industrial clusters - An identification of the basic mechanisms. *Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4(3).
- Brusco, S., Minerva, T., Poli, I. & Solinas, G. (2002). Un automa cellulare per lo studio del distretto industriale. *Politica Economica*, 18: 147-192.
- Chang, M. H. & Harrington, J. (2006). Chapter 26 Agent-Based Models of Organizations. En L. Tesfatsion & K. L. Judd (Eds), *Handbook of Computational Economics*, Volume 2 edn: 1273-1337: Elsevier.
- Chiaromonte, F. & Dosi, G. (1993). Heterogeneity, competition, and macroeconomic dynamics. *Structural Change and Economic Dynamics*, 4(1): 39-63.
- Coelho, H. & Schilperoord, M. (2003). Intersections: A management tool for science and technology parks. *Proceedings of the XX IASP world conference on science and technology parks*
- Cohen, M. D., Burkhart, R., Dosi, G., Egidi, M., Marengo, L., Warglien, M. & Winter, S. (1996). Routines and other recurring action patterns of organizations: Contemporary research issues. *Industrial and Corporate Change*, 5(3): 653-698.
- Cohen, W. E. & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive-Capacity. A New Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1): 128-152.
- Collier, N. T., Howe, T. & North, M. L. (2003). Onward and upward: the transition to Repast 2.0. *Proceedings of the First Annual North American Association for Computational Social and Organizational Science Conference*. Pittsburgh, PA
- Dawid, H. (2006). Chapter 25 Agent-based Models of Innovation and Technological Change. En L. Tesfatsion & K. L. Judd (Eds), *Handbook of Computational Economics*, Volume 2 edn: 1235-1272: Elsevier.
- Dawid, H. (1999). *Adaptive learning by genetic algorithms: Analytical results and applications to economic models*. Berlin: Springer-Verlag.
- Dixit, A. K. & Stiglitz, J. E. (1977). Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity. *American Economic Review*, 67(3): 297-308.
- Doorenbos, R., Etzioni, O. & Weld, D. (1997). A scaleable comparison-shopping agent for the world wide web. *Proceedings of the 1st Conference on Autonomous Agents (Agents 97)*: 39-48. Marina del Rey, CA
- Dopfer, K. (2005). *The evolutionary foundations of economics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dosi, G., Fabiani, S., Aversi, R. & Meacci, M. (1994). The Dynamics of International Differentiation: A Multi-Country Evolutionary Model. *Industrial and Corporate Change*, 3: 225-241.

- Dosi, G., Marsili, O., Orsenigo, L. & Salvatore, R. (1995). Learning, market selection and the evolution of industrial structures. *Small Business Economics*, 7(6): 411-436.
- Duffy, J. (2006). Chapter 19 Agent-Based Models and Human Subject Experiments. En L. Tesfatsion & K. L. Judd (Eds), *Handbook of Computational Economics*, Volume 2 edn: 949-1011: Elsevier.
- Edmonds, B. & Moss, S. (2005). From KISS to KIDS - an 'anti-simplistic' modelling approach. En P. Davidsson (Eds), *Lecture Notes in Artificial Intelligence 3415*: 130-140. Berlin: Springer.
- Edmonds, B. (2001). The Use of Models - making MABS actually work. En S. Moss & P. Davidsson (Eds), *Multi-Agent-Based Simulation, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1979*: 15-32. Berlin: Springer-Verlag.
- Edmonds, B. & Hales, D. (2003). Replication, replication and replication: Some hard lessons from model alignment. *Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(4).
- Epstein, J. M. (2001). Learning to be thoughtless: Social norms and individual computation. *Computational Economics*, 18(1): 9-24.
- Epstein, J. M. (1999). Agent-Based Computational Models and Generative Social Science. *Complexity*, 4(5): 41-60.
- Epstein, J. M. & Axtell, R. (1996). *Growing artificial societies: social science from the bottom up*. Washington, D.C: Brookings Institution Press.
- Epstein, J. M. (2006). Chapter 34 Remarks on the Foundations of Agent-Based Generative Social Science. En L. Tesfatsion & K. L. Judd (Eds), *Handbook of Computational Economics*, Volume 2 edn: 1585-1604: Elsevier.
- Fagerberg, J. (2003). Schumpeter and the revival of evolutionary economics: an appraisal of the literature. *Journal of Evolutionary Economics*, 13(2): 125-159.
- Feldman, M. P. (1994). *The geography of innovation*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Fioretti, G. (2001). Information structure and behaviour of a textile industrial district. *Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4(4).
- Fioretti, G. (2005). Agent-Based Models of Industrial Clusters and Districts. EconWPA Urban-Regional.
- Fisher, R. A. (1930). *The genetical theory of natural selection*. Oxford: Clarendon Press.
- Forrester, J. W. (1994). System Dynamics, Systems Thinking, and Soft Or. *System Dynamics Review*, 10(2-3): 245-256.
- Frenken, K. & Boschma, R. A. (2007). A theoretical framework for Evolutionary Economic Geography: Industrial dynamics and urban growth as a branching process. Papers in Evolutionary Economic Geography 07.01 Utrecht University.
- Fujita, M. & Krugman, P. (2004). The new economic geography: Past, present and the future. *Papers in Regional Science*, 83(1): 139-164.
- Fujita, M., Krugman, P. & Venables, A. J. (1999). *The spatial economy: cities, regions and international trade*. Cambridge: MIT Press.
- Fujita, M. & Thisse, J. F. (1996). Economics of agglomeration. *Journal of the Japanese and International Economies*, 10(4): 339-378.
- Galán, J. M. (2007). *Evaluación integradora de políticas de agua: modelado y simulación con sociedades artificiales de agentes*. Tesis Doctoral, Universidad de Burgos.

- Galán, J. M., Downing, T. E., López-Paredes, A. & Warwick, C. (2003a). Rigour and reliability in agent-based social simulation through replication. En *Online Proceedings of the First Conference of the European Social Simulation Association*. Groningen, The Netherlands.
- Galán, J. M., Izquierdo, L., Izquierdo, S., Santos, J. I., Olmo, R. & López-Paredes, A. (2007a). Understanding Simulations. En B. Edmonds & S. Moss (Eds), *Handbook on Simulating Social Complexity*: Springer.
- Galán, J. M., López-Paredes, A., Hernández, C. & Pajares, J. (2003b). La replicación en la Simulación Social Basada en Agentes. El caso de SDML y RePast. *Vetas*,(13): 75-102.
- Galán, J. M. & Izquierdo, L. R. (2005). Appearances Can Be Deceiving: Lessons Learned Re-Implementing Axelrod's 'Evolutionary Approach to Norms'. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 8(3).
- Galán, J. M., López-Paredes, A. & del Olmo, R. (2005a). Simulación basada en agentes en Teoría de Juegos Evolutiva: ¿pueden las metanormas evitar el colapso de una norma social? En D. de la Fuente (Eds), *IX Congreso de Ingeniería de Organización*: 65-66. Oviedo: ADINGOR.
- Galán, J. M., Santos, J. I., Izquierdo, S. S., Pascual, J. A., del Olmo, R. & López-Paredes, A. (2007b). Agent-Based Modelling in Domestic Water Management: Barcelona and Valladolid case studies. En A. López-Paredes & C. Hernández (Eds), *Agent-Based Modelling in Natural Resources Management*: Pearson Education.
- Galán, J. M., Santos, J. I., Izquierdo, S. S., del Olmo, R. & López-Paredes, A. (2005b). Simulating complex adaptive social systems with agents: domestic water management. *Proceedings of the IV International Workshop on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems*: 79-86. León: Universidad de León.
- Gilbert, N., Pyka, A. & Ahrweiler, P. (2001). Innovation networks - A simulation approach. *Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4(3): U131-U150.
- Gilbert, N. & Troitzsch, K. G. (1999). *Simulation for the social scientist*. Buckingham: Open University Press.
- Giret, A., Julián, V. & Botti, V. J. (2005). Aplicaciones Industriales de los Sistemas Multiagente. En A. Mas (Eds), *Agentes Software y Sistemas Multi-Agente. Conceptos, Arquitecturas y Aplicaciones*: 186-203. Madrid, Spain: Pearson Educación.
- Gode, D. K. & Sunder, S. (1993). Allocative Efficiency of Markets with Zero-Intelligence Traders - Market As A Partial Substitute for Individual Rationality. *Journal of Political Economy*, 101(1): 119-137.
- Hernandez, C. (2004). Herbert A. Simon, 1916-2001, y el Futuro de la Ciencia Económica. *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa*, 13(2): 7-23.
- Hernández, C. & Hernández, F. (1981). Causality and the Independence Phenomenon: the Case of the Demand for Money. *Journal of Econometrics*, 15: 247-263.
- Hernández, C. & López-Paredes, A. (1999). Beyond Experimental Economics: Trading Institutions and Multiagent Systems. *Computing in Economics and Finance 1999 from Society for Computational Economics*, 1351.
- Holland, J. H. (2002). Complex Adaptive Systems and Spontaneous Emergence. En A. Quadrio Curzio & M. Fortis (Eds), *Complex and Industrial Clusters. Dynamics and Models in Theory and Practice*: 25-34. New York: Physica-Verlag.
- Horgan, J. (1995). From Complexity to Perplexity. *Scientific American*,(June 1995): 74-79.

- Ijiri, Y. & Simon, H. A. (1977). *Skew Distributions and the Sizes of Business Firms*. New York: North-Holland.
- Isard, W. (1956). *Location and space-economy: a general theory relating to industrial location, market areas, land use, trade, and urban structure*. Cambridge: M.I.T. Press.
- Izquierdo, L. R., Izquierdo, S. S., Gotts, N. M. & Polhill, J. G. (2007). Transient and Asymptotic Dynamics of Reinforcement Learning in Games. *Games and Economic Behavior*, In press.
- Izquierdo, S. S. & Izquierdo, L. R. (2006). On the Structural Robustness of Evolutionary Models of Cooperation. En E. Corchado, H. Yin, V. J. Botti & C. Fyfe (Eds), *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2006. Lecture Notes in Computer Science 4224*: 172-182. Berlin Heidelberg: Springer.
- Izquierdo, S. S. & Izquierdo, L. R. (2007). The Impact on Market Efficiency of Quality Uncertainty without Asymmetric Information. *Journal of Business Research*, 60(8): 858-867.
- Izquierdo, S. S., Izquierdo, L. R., Galán, J. M. & Hernández, C. (2006). Market Failure Caused by Quality Uncertainty. En P. Mathieu, B. Beaufils & O. Brandouy (Eds), *Artificial Economics. A Symposium in Agent-based Computational Methods in Finance, Game Theory and their applications. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 564*: 203-214. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Jaffe, A. B., Trajtenberg, M. & Henderson, R. (1993). Geographic Localization of Knowledge Spillovers as Evidenced by Patent Citations. *Quarterly Journal of Economics*, 63(3): 577-598.
- Janssen, M. A. & Ostrom, E. (2006). Chapter 30 Governing Social-Ecological Systems. En L. Tesfatsion & K. L. Judd (Eds), *Handbook of Computational Economics*, Volume 2 edn: 1465-1509: Elsevier.
- Jonard, N. & Yildizoglu, M. (1998). Technological diversity in an evolutionary industry model with localized learning and network externalities. *Structural Change and Economic Dynamics*, 9(1): 35-53.
- Julián, V., Giret, A. & Botti, V. J. (2005). Aplicaciones en Recuperación de Información. En A. Mas (Eds), *Agentes Software y Sistemas Multi-Agente. Conceptos, Arquitecturas y Aplicaciones*: 221-231. Madrid, Spain: Pearson Educación.
- Klepper, S. (2001). Employee startups in high-tech industries. *Industrial and Corporate Change*, 10(3): 639-674.
- Klepper, S. (1996). Entry, Exit, Growth, and Innovation over the Product Life Cycle. *American Economic Review*, 86(3): 562-583.
- Klepper, S. (1997). Industry life cycles. *Industrial and Corporate Change*, 6(1): 145-181.
- Krugman, P. (1998). What's new about the new economic geography? *Oxford Review of Economic Policy*, 14(2): 7-17.
- Krugman, P. (1980). Scale Economies, Product Differentiation, and the Pattern of Trade. *American Economic Review*, 70(5): 950-959.
- Krugman, P. (1993). *Geography and trade*. London: MIT Press.
- Krugman, P. (1991). Increasing Returns and Economic-Geography. *Journal of Political Economy*, 99(3): 483-499.
- Krugman, P. & Venables, A. J. (1996). Integration, specialization, and adjustment. *European Economic Review*, 40(3-5): 959-967.

- Krugman, P. R. (1979). Increasing Returns, Monopolistic Competition, and International-Trade. *Journal of International Economics*, 9(4): 469-479.
- Kwasnicki, W. (2003). Evolutionary Models' Comparative Analysis. Methodology Proposition Based on Selected Neo-Schumpeterian Models of Industrial Dynamics. *The ICAI Journal of Managerial Economics*, 1(2): 34-61.
- Kwasnicki, W. (1996). *Knowledge, innovation and economy an evolutionary exploration*. Cheltenham: Edward Elgar.
- Lavios, J. J., Galán, J. M., Santos, J. I. & del Olmo, R. (2006). Could TAC be a laboratory for economists? En F. Díaz, J. M. Corchado & F. Fdez-Riverola (Eds), *Proceedings of the Fifth International Workshop on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (IWPAAMS'06)*: 209-212. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- LeBaron, B. (2006). Chapter 24 Agent-based Computational Finance. En L. Tesfatsion (Eds), *Handbook of Computational Economics*, Volume 2 edn: 1187-1233: Elsevier.
- LeBaron, B. (2000). Agent-based computational finance: Suggested readings and early research. *Journal of Economic Dynamics and Control*, (24): 679-702.
- Leombruni, R. & Richiardi, M. (2005). Why are economists sceptical about agent-based simulations? *Physica A*, 355: 103-109.
- López-Paredes, A. (2000). *Análisis e Ingeniería de la Instituciones Económicas. Una metodología basada en agentes.*, Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco.
- López-Paredes, A. (2001). *Análisis e Ingeniería de la Instituciones Económicas. Una metodología basada en agentes*. Zarautz: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
- López-Paredes, A. (2004). *Ingeniería de Sistemas Sociales. Diseño, Modelado y Simulación de Sociedades Artificiales de Agentes*. Valladolid: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Valladolid.
- López-Paredes, A. & del Olmo, R. (1998). The Social Dimension of Economics and Multiagent Systems. En B. Edmonds & K. Dautenhahn (Eds), *Socially Situated Intelligence: a workshop held at SAB'98*: 73-79. Zürich: University of Zürich.
- López-Paredes, A., Hernández, C. & Pajares, J. (2002). Towards a New Experimental Socio-economics. Complex Behaviour in Bargaining. *Journal of Socioeconomics*, 31: 423-429.
- López-Paredes, A., Saurí, D. & Galán, J. M. (2005). Urban water management with artificial societies of agents: The FIRMABAR simulator. *Simulation*, 81(3): 189-199.
- Lösch, A. (1954). *The economics of location*. New Haven: Yale University Press.
- Luck, M., McBurney, P., Shehory, O. & Willmott, S. (2004). *Agent Technology Roadmap: Overview and Consultation Report*. AgentLink.
- Luke, S., Cioffi-Revilla, C., Panait, L., Sullivan, K. & Balan, G. (2005). MASON: A Multiagent Simulation Environment. *Simulation*, 81: 517-527.
- Luna, F. (2002). Computable Learning, Neural Networks, and Institutions. En S. Chen (Eds), *Evolutionary Computation in Economics and Finance*: 211-232. New York: Physica-Verlag Heidelberg.
- Marks, R. (2006). Chapter 27 Market Design Using Agent-Based Models. En L. Tesfatsion & K. L. Judd (Eds), *Handbook of Computational Economics*, Volume 2 edn: 1339-1380: Elsevier.
- Marshall, A. (1890). *Principles of economics*. London: Macmillan.

- Maskell, P. (2001). The firm in economic geography. *Economic Geography*, 77(4): 329-344.
- Maskell, P. & Malmberg, A. (1999b). Localised learning and industrial competitiveness. *Cambridge Journal of Economics*, 23(2): 167-185.
- Maskell, P. & Malmberg, A. (1999a). Localised learning and industrial competitiveness. *Cambridge Journal of Economics*, 23(2): 167-185.
- Metcalfe, J. S. (1996). Economic dynamics and regional diversity. Some evolutionary ideas. En X. Vence-Dexa & J. S. Metcalfe (Eds), *Wealth from Diversity. Innovation, structural change and finance for regional development in Europe*: 19-38: Kluwer Academic Publishers.
- Moreno, A. (2005). Aplicaciones en Medicina. En A. Mas (Eds), *Agentes Software y Sistemas Multi-Agente. Conceptos, Arquitecturas y Aplicaciones*: 203-220. Madrid, Spain: Pearson Educación.
- Moss, S. & Davidsson, P. (2001). *Multi-Agent-Based Simulation, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1979*. Boston, MA, USA: Springer-Verlag.
- Neary, J. P. (2001). Of hype and hyperbolas: Introducing the new economic geography. *Journal of Economic Literature*, 39(2): 536-561.
- Nelson, R. R. (1995). Recent Evolutionary Theorizing About Economic-Change. *Journal of Economic Literature*, 33(1): 48-90.
- Nelson, R. R. & Winter, S. G. (2002). Evolutionary theorizing in economics. *Journal of Economic Perspectives*, 16(2): 23-46.
- Nelson, R. R. & Winter, S. G. (1982). *An evolutionary theory of economic change*. Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press.
- Newman, M. E. J. (2003). The structure and function of complex networks. *Siam Review*, 45(2): 167-256.
- North, M. L., Collier, N. T. & Vos, J. R. (2006). Experiences Creating Three Implementations of the Repast Agent Modeling Toolkit. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, (16): 1-25.
- Otter, H. S., Van Der Veen, A. & De Vriend, H. J. (2001). ABLOoM: Location behaviour, spatial patterns, and agent-based modelling. *JASSS*, 4(4).
- Overman, H. G. (2004). Can we learn anything from economic geography proper? *Journal of Economic Geography*, 4(5): 501-516.
- Pajares, J. (2001). *Modelos Evolucionistas en Dinámica Industrial: un enfoque cognitivo*. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco.
- Pajares, J., Pascual, J. A., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2003a). A behavioral, evolutionary and generative framework for modelling financial markets. En *The First European Social Simulation Association Conference*. Groningen.
- Pajares, J., Hernandez, C. & Lopez, A. (2003b). Diseño de políticas tecnológicas regionales de corte evolucionista. En *V Congreso de Ingeniería de Organización*. Valladolid.
- Pajares, J., Hernandez-Iglesias, C. & Lopez-Paredes, A. (2004). Modelling learning and R&D in innovative environments: a cognitive multi-agent approach. *Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 7(2).
- Pajares, J., Lopez, A. & Hernandez, C. (2003c). Industry as an organisation of agents: Innovation and R&D management. *Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(2).

- Pajares, J., Pascual, J. A., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2005a). The role of risk aversion and technical trading in the behaviour of financial markets. En K. G. Troitzsch (Eds), *Representing Social Reality. Pre-Proceedings of the Third Conference of the European Social Simulation Association*. Koblenz
- Pajares, J., Pascual, J. A., Hernández, C., López-Paredes, A. & ´ (2003d). A behavioral, evolutionary and generative framework for modelling financial markets. *Online proceedings of The First European Social Simulation Association Conference, ESSA'03*. Groningen
- Pajares, J., Pascual, J. A., Lopez-Paredes, A. & Hernandez-Iglesias, C. (2005b). Agent Based Simulation for Modelling Financial Markets: a Behavioral and Evolutionary Approach. En *Advancements of Modelling and Simulation Techniques in Enterprise: The Best of 2004*. Lyon.
- Pascual, J. A. (2006). *Modelado Multiagente de Mercados Financieros: Un Enfoque Basado en el Comportamiento Individual de los Inversores.*, Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid.
- Pascual, J. A., Pajares, J. & López-Paredes, A. (2003a). Mercados Financieros Artificiales: un Paso más hacia la Compresión de los Mercados Financieros Reales. En *V Congreso de Ingeniería de Organización*. Valladolid.
- Pascual, J. A., Pajares, J. & López-Paredes, A. (2003b). Mercados Financieros Artificiales: un Paso más hacia la Compresión de los Mercados Financieros Reales. En A. Redondo & J. J. De Benito (Eds), *Actas del V Congreso de Ingeniería de Organización*. Valladolid-Burgos: ADINGOR.
- Pascual, J. A., Pajares, J. & López-Paredes, A. (2006). Explaining the Statistical Features of the Spanish Stock Market from the bottom-up. En C. Bruun (Eds), *Advances in Artificial Economics. The Economy as a Complex Dynamic System. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 584*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Pavitt, K. (2003). The process of innovation. SPRU: Science and Technology Policy Research.
- Pavón, J. & Pérez, J. L. (2004). *Agentes software y sistemas multiagente*. Madrid: Pearson Education.
- Penrose, E. T. (1959). *The theory of the growth of the firm*. New York: Wiley.
- Polhill, J. G., Izquierdo, L. R. & Gotts, N. M. (2005). The ghost in the model (and other effects of floating point arithmetic). *Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 8(1).
- Polya, G. & Eggenberger, F. (1923). Ueber die Statistik verketteter Vorgaenge. *Z. Angew. Math. Mech.*,(3): 279-289.
- Porter, M. E. (1990). *The competitive advantage of nations*. New York: Free Press.
- Posada, M., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2005a). Electricity and Emission Permits Auctions in Spain: an ABM Analysis. The Third European Social Simulation Association Conference. Koblenz.
- Posada, M., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2004a). Emissions Permits Auctions: an ABM Analysis. The Second European Social Simulation Association Conference. Valladolid.
- Posada, M. (2005). *Análisis y diseño de la subasta doble. Una aproximación basada en agentes.*, Tesis Doctoral. Universidad del País Valladolid.
- Posada, M. (2006). Strategic Software Agents in Continuous Double Auction under Dynamic Environment. En E. Corchado, H. Yin, V. J. Botti & C. Fyfe (Eds), *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2006. Lecture Notes in Computer Science 4224*: 1223-1233. Berlin Heidelberg: Springer.

- Posada, M., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2004b). Aprendizaje Evolutivo en la Subasta Doble Continua. Un enfoque Multiagente. *VIII Congreso de Ingeniería de Organización*: 111-120. Leganes: ADINGOR.
- Posada, M., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2005b). Electricity and Emission Permits Auctions in Spain: an ABM Analysis. En K. G. Troitzsch (Eds), *Representing Social Reality. Pre-Proceedings of the Third Conference of the European Social Simulation Association*. Koblenz
- Posada, M., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2006a). Learning in a continuous double auction market. En P. Mathieu, B. Beaufils & O. Brandouy (Eds), *Artificial Economics. A Symposium in Agent-based Computational Methods in Finance, Game Theory and their applications. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 564*: 41-51. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Posada, M., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2006b). Strategic Behaviour in Continuous Double Auction. En C. Bruun (Eds), *Advances in Artificial Economics. The Economy as a Complex Dynamic System. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 584*. Heidelberg: Springer.
- Pred, A. R. (1966). *The spatial dynamics of U.S. urban-industrial growth 1800-1914, interpretive and theoretical essays*. Cambridge, Mass: M.I.T. Press.
- Prietula, M. J., Carley, K. M. & Gasser, L. (1998). *Simulating organizations: Computational models of institutions and groups*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Puga, D. (1999). The rise and fall of regional inequalities. *European Economic Review*, 43(2): 303-334.
- Romer, P. M. (1990). Endogenous Technological-Change. *Journal of Political Economy*, 98(5): S71-S102.
- Rust, J., Miller, J. H. & Palmer, R. (1994). Characterizing Effective Trading Strategies - Insights from A Computerized Double Auction Tournament. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 18(1): 61-96.
- Sansores, C. & Pavón, J. (2005). Simulación Social Basada en Agentes. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 9(25): 71-78.
- Santos, J. I., Olmo, R. & Pajares, J. (2007b). The Emergence of Social Networks from Interactive Learning. En S. Takahashi, D. Sallach & J. Rouchier (Eds), *Advancing Social Simulation. The First World Congress*: 237-248. Berlin Heidelberg: Springer.
- Santos, J. I., Olmo, R. & Pajares, J. (2006a). Estudio de la red de participaciones en tribunales de tesis doctorales de Organización y Gestión de Empresas en España. *X Congreso de Ingeniería de Organización*. Valencia
- Santos, J. I., Olmo, R. & Pajares, J. (2007a). Innovation and Knowledge Spillovers in a Networked Industry. En A. Consiglio (Eds), *Artificial Markets Modeling: Methods and Applications. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*: 171-180. Berlin Heidelberg: Springer.
- Santos, J. I., Olmo, R. & Pajares, J. (2005). Fenómenos de difusión de conocimiento y dimensión geográfica de la innovación, una aproximación multi-agente. *IX Congreso de Ingeniería de Organización*
- Santos, J. I., Galán, J. M. & del Olmo, R. (2006b). An Agent-Based Model of Personal Web Communities. En E. Corchado, H. Yin, V. J. Botti & C. Fyfe (Eds), *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2006. Lecture Notes in Computer Science 4224*: 1242-1249. Berlin Heidelberg: Springer.
- Santos, J. I., Posada, M., Pascual, J. A., Izquierdo, S. S., Galán, J. M. & López-Paredes, A. (2006c). Un Laboratorio de Economía Experimental en Internet. *X Congreso de Ingeniería de Organización*. Valencia

- Sanz, P., Benito, J. J., Arauzo, J. A. & del Olmo, R. (2004a). CIM y Empresa Virtual: la integración como forma de supervivencia. *Actas del VIII Congreso de Ingeniería de Organización*: 183-192. Leganés: ADINGOR.
- Sanz, P., De Benito, J. J., Arauzo, J. A. & del Olmo, R. (2004b). An agent-based framework for selection of partners modelling in a virtual enterprise. *Decision and Simulation in Engineering and Management Science - International Conference on Modelling and Simulation, ICMS'04*: 177-178
- Saviotti, P. P. & Pyka, A. (2004). Economic development by the creation of new sectors. *Journal of Evolutionary Economics*, 14(1): 1-35.
- Saxenian, A. (1994). *Regional advantage: culture and competition in Silicon Valley and route 128*. Cambridge: Harvard University Press.
- Scherer, F. M. & Ross, D. (1990). *Industrial market structure and economic performance*. Boston: Houghton Mifflin.
- Schumpeter, J. A. (1939). *Business cycles: a theoretical, historical, and statistical analysis of the capitalist process*. New York: McGraw-Hill Book Company, inc.
- Silverberg, G. (1997). Evolutionary Modeling in Economics: Recent History and Immediate Prospects. En *Workshop on Evolutionary Economics as a Scientific Research Programme*. Stockholm.
- Silverberg, G., Dosi, G. & Orsenigo, L. (1988). Innovation, Diversity and Diffusion - A Self-Organisation Model. *Economic Journal*, 98(393): 1032-1054.
- Silverberg, G. & Lehnert, D. (1993). Long Waves and 'Evolutionary Chaos' in a Simple Schumpeterian Model of Embodied Technical Change. *Structural Change and Economic Dynamics*, 4: 9-37.
- Silverberg, G. & Verspagen, B. (1994). Collective Learning, Innovation and Growth in a Boundedly Rational, Evolutionary World. *Journal of Evolutionary Economics*, 4: 207-226.
- Silverberg, G. & Verspagen, B. (2005). Evolutionary Theorizing on Economic Growth. En K. Dopfer (Eds), *The evolutionary foundations of economics*: 506-539. Cambridge: Cambridge University Press.
- Silverberg, G. & Verspagen, B. (2007). Self-organization of R&D search in complex technology spaces. ECIS Working Papers 05 Eindhoven Centre for Innovation Studies. Eindhoven University of Technology.
- Simon, H. A. (1959). Theories of Decision-Making in Economics and Behavioral-Science. *American Economic Review*, 49(3): 253-283.
- Simon, H. A. (1982). *Models of bounded rationality*. Cambridge: MIT Press.
- Squazzoni, F. & Boero, R. (2002). Economic performance, inter-firm relations and local institutional engineering in a computational prototype of industrial districts. *Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(1).
- Starrett, D. (1978). Market Allocations of Location Choice in A Model with Free Mobility. *Journal of Economic Theory*, 17(1): 21-37.
- Tesfatsion, L. (2006). Chapter 16 Agent-based computational economics: a constructive approach to economic theory. En L. Tesfatsion & K. L. Judd (Eds), *Handbook of computational economics*. Amsterdam: Elsevier.
- Tesfatsion, L. (2001b). Introduction to the special issue on agent-based computational economics. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 25(3-4): 281-293.

- Tesfatsion, L. (2002). Agent-based computational economics: Growing economies from the bottom up. *Artificial Life*, 8(1): 55-82.
- Tesfatsion, L. (2003). Agent-Based Computational Economics. En Iowa State University (Eds), *Economics Working Paper 1*
- Tesfatsion, L. (1996). Agent-based computational economics: a constructive approach to economic theory. En L. Tesfatsion, K. L. Judd, H. M. Amman, D. A. Kendrick & J. Rust (Eds), *Handbook of computational economics*. Amsterdam: Elsevier.
- Tesfatsion, L. (2001a). Structure, behavior, and market power in an evolutionary labor market with adaptive search. *Journal of Economic Dynamics and Control*, (25): 419-457.
- Tesfatsion, L. & Judd, K. L. (2006). *Handbook of computational economics*. Amsterdam: Elsevier.
- Thünen, J. H. v. (1826). *Der isolirte staat in beziehung auf landwirthschaft und nationalökonomie, oder, Untersuchungen über den einfluss, den die getreidepreise, der reichthum des bodens und die abgaben auf den ackerbau ausüben*. Hamburg: F. Perthes.
- Tobias, R. & Hofmann, C. (2004). Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation. *Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 7(1).
- Veblen, T. (1998). Why is economics not an evolutionary science? (Reprinted from Quarterly Journal of Economics, pg 373-397, July 1898). *Cambridge Journal of Economics*, 22(4): 403-414.
- Venables, A. J. (1996). Equilibrium locations of vertically linked industries. *International Economic Review*, 37(2): 341-359.
- Wavish, P. & Graham, M. (1996). A situated action approach to implementing characters in computer games. *International Journal of Applied Artificial Intelligence*, 10(1): 53-74.
- Weber, A. & Friedrich, C. J. (1929). *Theory of the location of industries*. Chicago: University of Chicago Press.
- Weitzman, M. L. (1998). Recombinant growth. *Quarterly Journal of Economics*, 113(2): 331-360.
- Wilhite, A. (2001). Bilateral trade and 'small-world' networks. *Computational Economics*, (18): 49-64.
- Winter, S. G. (1984). Schumpeterian Competition in Alternative Technological Regimes. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 5(3-4): 287-320.
- Winter, S. G., Kaniovski, Y. M. & Dosi, G. (2000). Modeling industrial dynamics with innovative entrants. *Structural Change and Economic Dynamics*, 11(3): 255-293.
- Winter, S. G. & Szulanski, G. (2001). Replication as Strategy. *Organization Science*, 12(6): 730-743.
- Wooldridge, M. J. (1999). Intelligent Agents. En G. Weiss (Eds), *Multiagent Systems. A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence: 27-72*. Cambridge, MA; London, UK: The MIT Press.
- Wooldridge, M. J. & Jennings, N. R. (1995). Intelligent Agents: Theory and Practice. *Knowledge Engineering Review*, 10(2): 115-152.
- Yildizoglu, M. (2002). Competing R&D strategies in an evolutionary industry model. *Computational Economics*, 19(1): 51-65.
- Yitzhaki, S. (1994). Economic distance and overlapping of distributions. *Journal of Econometrics*, 61(1): 147-159.

- Young, H. P. (2006). Chapter 22 Social Dynamics: Theory and Applications. En L. Tesfatsion & K. L. Judd (Eds), *Handbook of Computational Economics*, Volume 2 edn: 1081-1108: Elsevier.
- Zhang, J. (2003). Growing Silicon Valley on a landscape: An agent-based approach to high-tech industrial clusters. *Journal of Evolutionary Economics*, 13(5): 529-548.