

ANÁLISIS DE LOS PATRONES DE ADOPCIÓN DE
UNA TECNOLOGÍA DE TELETRABAJO EN UNA
UNIDAD DE UNA IES

CARLOS ANDRÉS ARBELÁEZ VELÁSQUEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS
MAESTRIA EN GESTIÓN TECNOLÓGICA
MEDELLÍN

2020

ANÁLISIS DE LOS PATRONES DE ADOPCIÓN DE UNA
TECNOLOGÍA DE TELETRABAJO EN UNA UNIDAD DE UNA
IES

CARLOS ANDRÉS ARBELÁEZ VELÁSQUEZ

Trabajo de grado para optar al título de
Magíster en Gestión Tecnológica

Asesor

Santiago Quintero Ramírez

PhD.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERIAS

MAESTRIA EN GESTIÓN TECNOLÓGICA

MEDELLÍN

2020

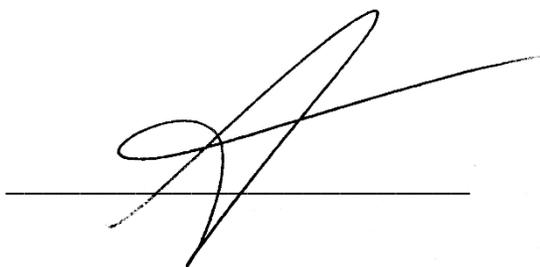
DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Junio 18 de 2020

Carlos Andrés Arbeláez Velásquez

“Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad”. Art. 92, párrafo, Régimen Estudiantil de Formación Avanzada.

Firma

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized initial 'C' followed by a long horizontal stroke extending to the right. The signature is written over a solid horizontal line.

Esta tesis la dedico a todos quien han me han brindado su apoyo incondicional y su sacrificio para acompañarme y alentarme en el camino de la vida. A mis padres que con su esfuerzo y dedicación hicieron de un bebé lo que hoy soy, a mi amada esposa que con su cariño y ternura siempre me ha brindado apoyo y motivación, a mis hijos que han sido un motor para justificar todo esfuerzo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Antioquia por el apoyo brindado y por permitir el uso de datos originados en sus procesos internos, al profesor Santiago Quintero Ramírez por las orientaciones oportunas que amablemente brindó para el desarrollo de este trabajo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
1. MARCO TEÓRICO	15
1.1. Modelos agregados de difusión de la innovación.....	19
1.1.1. Modelos empíricos parsimoniosos	20
1.1.1.1. El modelo de Bass.....	20
1.1.1.2. Extensiones del modelo de Bass	24
1.1.1.3. Fortalezas de los modelos agregados	25
1.1.1.4. Limitaciones de los modelos agregados.....	26
1.1.1.5. Características de los modelos de dinámica de sistemas.....	28
1.1.1.6. El modelo de Bass desde la dinámica de sistemas	29
1.2. Modelos desagregados de la difusión de la innovación	30
1.2.1. Modelos microeconómicos	31
1.2.2. Modelos estocásticos de selección de marcas	31
1.2.3. Modelos basados en agentes	32
1.2.3.1. Modelación de la heterogeneidad de individuos.....	34
1.2.3.2. Modelación del comportamiento de los adoptantes	35
1.3. El teletrabajo	38
2. ESTADO DEL ARTE	41
2.1. Modelos basados en la optimización matemática	41
2.2. Modelos basados en la economía.....	44
2.2.1. Minimización de costo.....	44
2.2.2. Maximización de las ganancias	46
2.2.3. Maximización de la utilidad	46
2.3. Modelos de agentes cognitivos.....	50
2.3.1. Modelo de acuerdo relativo	50
2.3.2. Teoría del comportamiento planeado.....	51
2.3.3. Modelo Consumat	54
2.3.4. El modelo LARA	55
2.4. Modelos heurísticos.....	56

2.5.	Modelos basados en la estadística	56
2.5.1.	<i>Analysis Conjoint</i>	56
2.5.2.	Modelos de selección discreta	58
2.5.3.	Modelos de aprendizaje de máquinas.....	59
2.6.	Modelos de influencia social	59
3.	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	61
3.1.	Problema	61
3.2.	Hipótesis.....	63
3.3.	Justificación	64
3.4.	Objetivos	64
3.4.1.	Objetivo General	64
3.4.2.	Objetivos Específicos.....	65
3.5.	Enfoque de la investigación	65
4.	Metodología y resultados	67
4.1.	Enfoque metodológico.....	67
4.2.	Construcción del modelo	69
4.2.1.	Construcción del modelo conceptual	69
4.2.1.1.	Los agentes	69
4.2.1.2.	Las reglas de los agentes	72
4.2.1.3.	Los parámetros del modelo	75
4.2.2.	Validación del modelo conceptual.....	78
4.2.3.	Construcción del modelo computacional	80
4.2.4.	Verificación del modelo computacional	84
4.2.5.	Validación Operativa	92
4.3.	Análisis de patrones de adopción	97
4.3.1.	Escenarios simulados para Directivos	98
4.3.2.	Escenarios simulados para Asociados	101
4.3.3.	Escenarios simulados para Ocasionales	103
4.3.4.	Escenarios simulados para NoDocentes	106
4.3.5.	Identificación y análisis de patrones de adopción	107
5.	Conclusiones	111
6.	Trabajo futuro	114

7. Lecciones aprendidas	115
Bibliografía.....	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Número no acumulado de adopciones por influencia externa e interna en el modelo de Bass.	23
Figura 2: Curvas de adopción para $N(t)$ y $n(t)$ según el modelo de Bass, para $M=1$ y diferentes valores de p y q	24
Figura 3: Diagrama de flujos y niveles de dinámica de sistemas para el modelo de Bass	30
Figura 4: Proceso adoptado para la creación, validación y verificación de modelos.....	65
Figura 5: Diagrama de flujo base del modelo computarizado	79
Figura 6. Captura de pantalla del modelo implementado en Netlogo.....	82
Figura 7. Iniciación, posicionamiento y distribución de agentes al ejecutar los procedimientos de la fase Setup.....	83
Figura 8. Seguimiento al cambio de estado de un agente de la categoría Directivos.....	86
Figura 9. Seguimiento al cambio de estado de un agente de la categoría Asociados.....	87
Figura 10. Seguimiento al cambio de estado de un agente de la categoría Ocasionales.....	87
Figura 11. Seguimiento al cambio de estado de un agente de la categoría NoDocentes.....	91
Figura 12. Seguimiento al cambio de estado del agente entorno.....	90
Figura 13. Curvas acumuladas de adopción del modelo construido y modelo de Bass para agentes en la categoría Directivos.....	94
Figura 14. Curvas de adopción acumulada generadas por el modelo construido y modelo de Bass para agentes en la categoría Asociados.....	96
Figura 15. Curvas de adopción acumulada generadas por el modelo construido y modelo de Bass para agentes en la categoría Ocasionales.....	96
Figura 16. Curvas de adopción acumulada generadas por el modelo construido y modelo de Bass para agentes en la categoría NoDocentes.....	96
Figura 17. Curvas de adopción para distintos escenarios simulados asociados a los Directivos....	99
Figura 18. Curvas de adopción para distintos escenarios simulados asociados a los Asociados...	102
Figura 19. Curvas de adopción para distintos escenarios simulados asociados a los Ocasionales.....	105

Figura 20. Curvas de adopción para distintos escenarios simulados asociados a los
NoDocentes.....108

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros configurados en el modelo construido y parámetros del modelo de Bass que ofrecieron la mejor calidad de ajuste.....	93
Tabla 2. Parámetros configurados en el modelo de simulación para cada escenario asociado a Directivos.....	100
Tabla 3. Parámetros configurados en el modelo de simulación para cada escenario asociado a Asociados.....	103
Tabla 4. Parámetros configurados en el modelo de simulación para cada escenario asociado Ocasionales.....	106
Tabla 5. Parámetros configurados en el modelo de simulación para cada escenario asociado NoDocentes.....	109
Tabla 6. Identificación y análisis de patrones de adopción.....	109

RESUMEN

Se presenta un modelo de difusión de la innovación basado en agentes que permite analizar mediante simulaciones los patrones de adopción de una tecnología de teletrabajo en una IES. El modelo se construyó siguiendo el proceso metodológico para la creación, validación y verificación de modelos propuesto por Sargent (2011; 2013) y adaptado por Quintero y otros (2017). Las simulaciones realizadas producen curvas de adopción acumulada con formas sigmoideas que se aproximan a las observadas en la realidad. Los resultados obtenidos sugieren que la heterogeneidad de la población, las cualidades particulares que posee y los esfuerzos de comunicación iniciales son factores que impactaron significativamente el proceso de adopción. Además también sugieren que la principal razón detrás de la fase de crecimiento rápido de las curvas de adopción observadas, es el incremento temporal de la utilidad que los potenciales adoptantes encuentran en la innovación, así como el aumento transitorio de la influencia externa que actúa sobre ellos.

PALABRAS CLAVE: Difusión de tecnologías, Modelo de simulación, Telemática

INTRODUCCIÓN

La teoría de la difusión de la innovación fue introducida por Everett M. Rogers en 1962 y definida como el proceso por el cual una innovación (sea una idea, una práctica o un nuevo producto) es comunicada por medio de determinados canales entre los miembros de un sistema social a través del tiempo (Rogers 1962). Es un campo interdisciplinario con raíces en la antropología (Wissler, 1915), la psicología (Tarde, 1903), la geografía (Hägerstrand, 1967), las ciencias políticas (Walker, 1969), la economía (Griliches, 1957), y el mercadeo (Arndt, 1967); que se podría considerar como uno de los mecanismos más importantes de cambio social y tecnológico (Katz 1963).

El paradigma de la difusión de la innovación se estableció en 1943 con la publicación de los resultados de un estudio sobre semillas híbridas de maíz conducido por Bryce Ryan y Neal C. Gross, psicólogos rurales de la Universidad Estatal de Iowa (Ryan y Gross, 1943), en este paradigma se postula que los mercados están dominados por influencias sociales, como ocurre cuando las decisiones de un individuo dependen de decisiones que han tomado ya otros consumidores (Delre et al., 2007a), la premisa básica es entonces, que los nuevos productos, las nuevas ideas y las nuevas prácticas se propagan en gran medida a través de la comunicación interpersonal (Hägerstrand, 1967; Katz 1963; Ryan, 1943; Rogers, 1983; Valente y Rogers, 1995; Valente y Davis, 1999; Valente, 2005).

Dicha premisa fue ya incluida en la teoría de la difusión introducida por Rogers en 1962, en donde se explica que el número acumulado de adoptantes de una innovación en el tiempo, típicamente sigue una curva S en la que se pueden observar cuatro fases de crecimiento (Rogers 1962). Inicialmente la curva tiene un crecimiento lento que ocurre mientras las primeras personas adoptan la innovación, a este grupo clave se les llama innovadores. Luego se observa una fase de crecimiento un poco más rápido cuando otro grupo de personas adopta la innovación, a este grupo clave se le llama adoptantes tempranos. Después la curva se hace un poco más pronunciada mientras los miembros de la mayoría temprana y la mayoría tardía adoptan la innovación. Finalmente, la curva aumenta un ritmo más lento mientras los

miembros del último grupo, los rezagados, adoptan la innovación. Esta clasificación de los adoptantes en grupos o categorías está basada en el grado en el cual un individuo o una unidad de adopción es relativamente proclive a la adopción de nuevas ideas con respecto a los otros miembros de un sistema social (Rogers, 2003).

La velocidad y el grado con el que una innovación se difunde, es decir la pendiente y la altura de la curva S asociada, está relacionada con diferentes factores, (Rogers, 1995) sostiene que la mayor parte de la variación en la tasa de adopción, entre el 49% y el 87%, se explica mediante cinco atributos de la innovación: Ventajas relativas, Compatibilidad, Posibilidad de observación, Complejidad y Posibilidad de ensayo.

En (Rogers, 2003) se conceptualiza sobre el mecanismo de adopción de los consumidores como un proceso, y se postula que las personas pasan por una secuencia de cinco estados para determinar si adoptan o rechazan una innovación: un estado de conocimiento, un estado de persuasión, un estado de decisión, un estado de implementación, un estado de confirmación

Los aportes realizados por Rogers proveen un rico marco conceptual que ha influenciado significativamente la investigación en difusión de la innovación, sin embargo no provee herramientas cualitativas de estudio para investigar la difusión de nuevos productos o para investigar el efecto de diversas variables estratégicas en el proceso de difusión (Kiesling, 2011). En este sentido, desde tiempo atrás se han desarrollado diferentes aproximaciones para tratar de capturar el proceso de difusión de la innovación de forma matemática, los cuales están principalmente representados en modelos cuantitativos que se pueden dividir según su enfoque en dos categorías: agregados y desagregados.

Los modelos agregados de difusión de la innovación típicamente están basados en una descripción matemática del flujo de individuos que se da entre dos poblaciones mutuamente excluyentes: adoptantes y no adoptantes (generalmente este flujo se describe mediante ecuaciones diferenciales); aunque esta categoría constituye la mayoría de la literatura

disponible actualmente sobre modelamiento de difusión de la innovación, también existen aproximaciones desde la dinámica de sistemas que abordan la difusión de la innovación como un proceso dinámico desarrollado en un sistema complejo.

Los modelos desagregados de la difusión de la innovación abordan específicamente las decisiones de innovación a nivel de individuo, y determinan la respuesta de un mercado mediante la agregación o sumatoria de la demanda de consumidores individuales que no necesariamente son homogéneos y que no son meramente transmisores de información (cf. Mahajan y otros, 1979); en lugar de eso, toman decisiones deliberadamente de forma independiente. En este sentido, los modelos desagregados están mucho más basados en el comportamiento de los individuos que los modelos agregados que investigan la relación entre variables a un nivel macro.

Los modelos desagregados de difusión de la innovación se pueden dividir en tres grandes categorías: modelos microeconómicos, modelos estocásticos de selección de marcas y los modelos de simulación basada en agentes (en adelante MBA) los cuales han aparecido más recientemente.

Este trabajo presenta la construcción de un modelo basado en agentes aplicado al análisis de la dinámica de la difusión de la una herramienta de teletrabajo denominada Sistema de Acceso Remoto a la oficina -SAROFI- en una unidad de una Institución de Educación Superior, el modelo una vez validado es calibrado de modo que al usarlo para realizar simulaciones se puedan reproducir de forma aceptable las curvas de adopción acumulada que fueron observados cuando el fenómeno de difusión ocurrió en la realidad. Finalmente a partir del modelo ya afinado se exploran distintos escenarios de difusión se realiza un análisis de los patrones de adopción observados.

A fin de presentar las distintas etapas del trabajo realizado, este documento está organizado así: en el Capítulo 1 se presenta el marco teórico donde se describen los distintos tipos de modelos a través de los cuales se ha abordado la difusión de la innovación, en el Capítulo 2

se presenta el estado del arte donde se describen los modelos basados en agentes aplicados a la difusión de la innovación que se han reportado en la literatura, en el Capítulo 3 se presenta la metodología y Resultados donde se describe el proceso de creación y validación del modelo además del análisis de los patrones de adopción, finalmente en el Capítulo 4 se presentan las conclusiones.

1. MARCO TEÓRICO

La teoría de la difusión de la innovación fue introducida por Everett M. Rogers en 1962 y definida como el proceso por el cual una innovación (*sea una idea, una práctica o un nuevo producto*) es comunicada por medio de determinados canales entre los miembros de un sistema social a través del tiempo (Rogers, 1962). Es un campo interdisciplinario con raíces en la antropología (Wissler, 1915), la psicología (Tarde, 1903), la geografía (Hagerstrand, 1967), las ciencias (Walker, 1969), la economía (Griliches, 1957), y el mercadeo (Arndt, 1967); que se podría considerar como uno de los mecanismos más importantes de cambio social y tecnológico (Katz, Levin, & Hamilton, 1963).

Desde el punto de vista económico Joseph A. Schumpeter en 1942 introdujo la innovación como una causa de desarrollo económico, definiéndola como un proceso de destrucción creativa que consiste en la introducción de: nuevos bienes y servicios en el mercado, el surgimiento de nuevos métodos de producción y transporte, la apertura de un nuevo mercado, la generación de una nueva fuente de oferta de materias primas, o el cambio de los procesos de gestión de las organizaciones.

El paradigma de la difusión de la innovación se estableció en 1943 con la publicación de los resultados de un estudio sobre semillas híbridas de maíz conducido por Bryce Ryan y Neal C. Gross, psicólogos rurales de la Universidad Estatal de Iowa (Ryan & Gross, 1943), en este paradigma se postula que los mercados están dominados por influencias sociales, como ocurre cuando las decisiones de un individuo dependen de decisiones que han tomado ya otros consumidores (Delre S. , Jager, Bijmolt, & Janssen, 2007), la premisa básica es entonces, que los nuevos productos, las nuevas ideas y las nuevas prácticas se propagan en gran medida a través de la comunicación interpersonal

(Hagerstrand, 1967; Katz, Levin, & Hamilton, 1963; Ryan & Gross, 1943; Rogers, Diffusion of innovations, 1983; Valente & Rogers, The Origins and Development of the Diffusion of Innovation Paradigm as an Example of Scientific Growth, 1995; Valente & Davis,

Accelerating the diffusion of innovations using opinion leaders, 1999; Valente, Network models and methods for studying the diffusion of innovations, 2005)

Dicha premisa fue ya incluida en la teoría de la difusión introducida por Rogers en 1962, en donde se explica que el número acumulado de adoptantes de una innovación en el tiempo, típicamente sigue una curva S en la que se pueden observar cuatro fases de crecimiento (Rogers, Diffusion of innovations., 1962). Inicialmente la curva tiene un crecimiento lento que ocurre mientras las primeras personas adoptan la innovación, a este grupo clave de les llama *innovadores*. Luego se observa una fase de crecimiento un poco más rápido cuando otro grupo de personas adopta la innovación, a este grupo clave se le llama *adoptantes tempranos*. Después la curva se hace un poco más pronunciada mientras los miembros de la *mayoría temprana* y la *mayoría tardía* adoptan la innovación. Finalmente, la curva aumenta un ritmo más lento mientras los miembros del último grupo, los rezagados, adoptan la innovación.

Esta clasificación de los adoptantes en grupos o categorías está basada en su “nivel innovativo”, el cual se define como el grado en el cual un individuo o una unidad de adopción es relativamente proclive a la adopción de nuevas ideas con respecto a los otros miembros de un sistema social (Rogers, Diffusion of innovations, 2003).

En general, las personas que pertenecen a los grupos que adoptan inicialmente la innovación, parecen asignarle un mayor peso a sus necesidades individuales y tener un nivel de aspiración más alto, además de buscar información más activamente (Rogers, Diffusion of innovations, 1983); mientras que las personas que pertenecen a los grupos que adoptan la innovación de una forma posterior, parecen darle más peso a sus necesidades sociales, tener un nivel de aspiración más bajo y ser menos activos para buscar información, además de ser menos proclives a la imitación en condiciones de incertidumbre (Rogers, 1983). Esta situación

indica que las personas que tienen un menor nivel de tolerancia a la incertidumbre pueden verse más fácilmente involucradas en procesos sociales como la comparación y la imitación.

En este sentido, se presume que alcanzar una cantidad suficiente de modelos de rol (*persona cuyo comportamiento, ejemplo o éxito, es o puede ser emulado por otros*) dentro del conjunto de adoptantes de una innovación, incrementa la posibilidad de que ésta continúe propagándose sin esfuerzos de estimulación significativos, ya que las personas menos innovadoras parecen involucrarse más en la comparación la imitación social, y por lo tanto se muestran más proclives a la adoptar la innovación cuando otros individuos ya lo han hecho (Rogers, Diffusion of innovations, 2003). A este umbral crítico de éxito o fracaso de la difusión de un producto generalmente se le llama “*chasm*” como por ejemplo en (Moore, 1991). Este “*chasm*” es de especial importancia en los mercados de alta tecnología, donde separa los mercados tempranos de los mercados del flujo principal (Moore, 1991).

La velocidad y el grado con el que una innovación se difunde, es decir la pendiente y la altura de la curva S asociada, está relacionada con diferentes factores, (Rogers, 2003) sostiene que la mayor parte de la variación en la tasa de adopción, entre el 49% y el 87%, se explica mediante cinco atributos de la innovación:

- **Ventajas relativas:** En qué medida la innovación propuesta es mejor que aquello que reemplaza.
- **Compatibilidad:** En qué medida la innovación es compatible con los valores, cultura, experiencias previas y necesidades de los potenciales adoptantes.
- **Posibilidad de observación:** En qué medida se pueden ver los resultados y consecuencias de la adopción de la innovación.

- **Complejidad:** En qué medida la innovación es difícil de aplicar, comprender y mantener.
- **Posibilidad de ensayo:** En qué medida la innovación se puede probar o experimentar antes de que se adquiriera el compromiso de adoptarla.

Además de los anteriores atributos, otros factores también se pueden influir sobre la tasa de adopción, como lo son:

- El proceso de decisión de innovación que usan los adoptantes
- Los canales de comunicación involucrados en la difusión de la innovación
- La naturaleza del sistema social en que se ubica la innovación
- La magnitud de los esfuerzos promocionales realizados por los agentes de cambio

En (Rogers, 2003) se conceptualiza sobre el mecanismo de adopción de los consumidores como un proceso, y se postula que las personas pasan por una secuencia de cinco estados para determinar si adoptan o rechazan una innovación:

1. **Un estado de conocimiento:** en el cual el individuo ha estado expuesto a la innovación y toma conciencia de su existencia, pero no busca activamente información sobre ella.
2. **Un estado de persuasión:** en el cual el individuo busca activamente información sobre la innovación.
3. **Un estado de decisión:** el cual el individuo decide si adopta o rechaza la innovación.
4. **Un estado de implementación:** en el cual el individuo hace uso de la innovación y termina su utilidad.

5. **Un estado de confirmación:** en el cual el individuo deja en firme su decisión sobre adoptar o rechazar la innovación basado en la experiencia que tuvo con su implementación.

Esta conceptualización, más allá de asumir que los individuos evalúan y ejecutan objetiva y racionalmente sus decisiones de innovación en cada estado y momento específico, resalta la importancia de la formación dinámica de actitudes y percepciones subjetivas que son transmitidas mediante la comunicación entre los miembros del sistema social.

Los aportes realizados por Rogers proveen un rico marco conceptual que ha influenciado significativamente la investigación en difusión de la innovación, sin embargo no provee herramientas cualitativas de estudio para investigar la difusión de nuevos productos o para investigar el efecto de diversas variables estratégicas en el proceso de difusión (Kiesling, *Planning the market introduction of new products: An agent-based simulation of innovation diffusion*, 2011). En este sentido, desde tiempo atrás se han desarrollado diferentes aproximaciones para tratar de capturar el proceso de difusión de la innovación de forma matemática, los cuales están principalmente representados en modelos cuantitativos que se pueden dividir según su enfoque en dos categorías: agregados y desagregados.

1.1. Modelos agregados de difusión de la innovación

Estos modelos se desarrollaron de forma significativa desde la década de 1960, básicamente motivados por el interés de ejecutivos en pronosticar las ventas de nuevos productos, los primeros modelos matemáticos usados para describir la propagación de nuevos productos en el mercado estaban basados en analogías con modelos de la epidemiológica, la biológica y la ecológica (Mahajan & Muller, *Innovation Diffusion and New Product Growth Models in Marketing*, 1979). Típicamente los modelos agregados están basados en una descripción matemática del flujo de individuos que se da entre dos poblaciones mutuamente excluyentes: adoptantes y no adoptantes (generalmente este flujo se describe mediante ecuaciones diferenciales); aunque esta categoría constituye la mayoría de la literatura disponible actualmente sobre modelamiento de difusión de la innovación, también existen aproximaciones desde la dinámica de sistemas que abordan

la difusión de la innovación como un proceso dinámico desarrollado en un sistema complejo (Squazzoni, 2010).

1.1.1. Modelos empíricos parsimoniosos

Estos modelos constituyen uno de los enfoques más tradicionales al modelamiento de la difusión de la innovación, están basados en los trabajos (Fourt & Woodlock, 1960; Mansfield, 1961; Bass F. , 2004) usan modelos matemáticos parsimoniosos cuyos parámetros se estiman estadísticamente de forma que se ajusten de la mejor manera posible a series de tiempo de difusión de la innovación que han sido observados empíricamente.

La amplia producción de literatura sobre este tipo de modelos ha sido ya revisada por varios autores, como es el caso de Mahajan & Muller(1979) que abordaron las contribuciones iniciales al respecto y (Mahajan, Muller, & Bass, *New Product Diffusion Models in Marketing: A Review and Directions for Research*, 1990; Mahajan, Muller, & Bass, *Diffusion of New Products: Empirical Generalizations and Managerial Uses*, 1995) que hicieron una revisión del modelo de difusión de la innovación de Bass (*descrito en la siguiente sección*) y sus aplicaciones. Más recientemente Meade y Islam (2006), revisaron la literatura producida sobre modelamiento y pronóstico de la difusión de la innovación, en una franja de tiempo de 25 años, y concluyeron que finalmente pocas preguntas han sido resueltas en este campo de investigación. Gran parte de la producción literaria sobre este tipo de modelos, trata el modelo de difusión de Bass, de sus extensiones y/o refinamientos, pero sin alterar su premisa básica (Mahajan, Muller, & Bass, *New Product Diffusion Models in Marketing: A Review and Directions for Research*, 1990; Bemmaor, 1992)

1.1.1.1. El modelo de Bass

El modelo de Bass conceptualiza sobre la difusión de bienes duraderos de consumo como un proceso contagioso que se inicia por los medios de comunicación masiva, es impulsado por el voz a voz, y se describe por medio de

una ecuación diferencial para cual existe una solución de forma cerrada (Bass F., 2004). Debe tenerse en cuenta que Bass se alineó con la teoría de la difusión de la innovación propuesta por Rogers en 1962, y especificó que la difusión de la innovación estaba impulsada fundamentalmente por dos influencias: la innovación y la imitación, las cuales estaban asociadas a dos parámetros de control del modelo: el coeficiente de innovación y el coeficiente de imitación. No obstante, estos términos sugieren una división de la población adoptante potencial en innovadores e imitadores; y ya que el modelo matemático propuesto supone que la población es homogénea, Lekvall y Wahlbin (1973) propusieron los términos que finalmente se convirtieron en los más comúnmente usados para dichas influencias:

- **La influencia externa:** como es el caso de la publicidad y los medios de comunicación masiva
- **La influencia interna:** como es el caso de la voz a voz

En el modelo de Bass, la probabilidad de que un individuo adopte un nuevo producto en un tiempo t , dado que aún no lo ha adoptado, depende linealmente de dos influencias: una que no está relacionada con el número de adoptantes previos y que se representa el parámetro de influencia externa p , y otra que sí está relacionada con el número de adoptantes previos que se representa por el parámetro de influencia interna q . El límite de la probabilidad de que un actor adopte una innovación en un tiempo $t + \delta t (\delta t \rightarrow 0)$ dado que no ha adoptado aún está dada por:

$$\frac{f(t)}{1-F(t)} = p + qF(t) \quad (1)$$

Dónde: $f(t)$ es la probabilidad de adopción en el tiempo t , $F(t)$ es la función de distribución acumulada para la adopción en un tiempo t , y p y q son los parámetros mencionados arriba.

No obstante, dado que los modelos agregados, como es el caso de este modelo de Bass, se ocupan principalmente de modelar en número de adoptantes en un tiempo t : $n(t)$ (Mahajan and Muller, 1979), la ecuación anterior típicamente se utiliza expresada de esta forma:

$$n(t) = [p + q(\frac{N(t)}{M})][M - N(t)] \quad (2)$$

Donde $N(t)$ es el número de consumidores que ya han adoptado en un tiempo t , M es el mercado potencial, y p y q son los parámetros mencionados antes. Al usar esta forma de la ecuación se puede graficar $n(t)$ en el tiempo, lo que produce un curva tipo campana del número de nuevos adoptantes, mientras que si se grafica $N(t)$ en el tiempo se obtiene la típica curva S representativa de la difusión de la innovación.

El primer caso se muestra en la Figura 1, donde se puede observar que al inicio el proceso de difusión, ésta es impulsada completamente por la influencia externa, originalmente asociada por Bass a los innovadores, y luego en una etapa posterior del proceso empieza a darse un impulso compartido tanto por la influencia externa como por la interna, originalmente asociada por Bass a los imitadores, dando paso finalmente a una etapa donde disminuye el impulso de la influencia externa a medida que la difusión se hace auto sostenible.

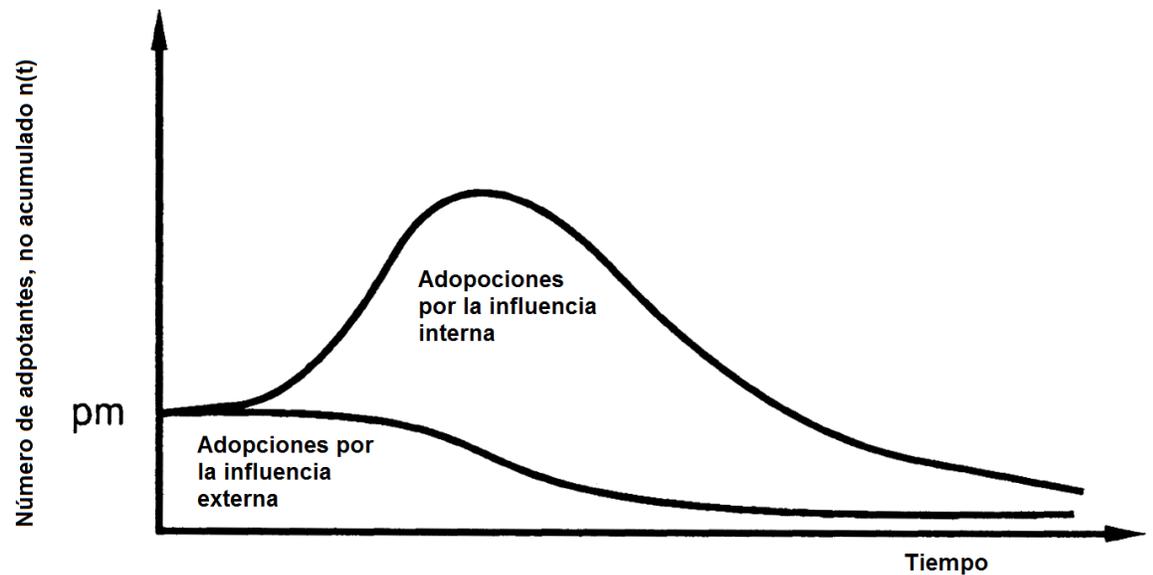


Figura 1 : Número no acumulado de adopciones por influencia externa e interna en el modelo de Bass.

Fuente: Construcción del autor a partir de la gráfica original presentada en (Mahajan, Muller, & Bass, New Product Diffusion Models in Marketing: A Review and Directions for Research, 1990)

El segundo caso se muestra en la Figura 2, donde se puede observar la típica curva S de la difusión de la innovación correspondiente a $N(t)$ para diferentes valores de los parámetros p y q , el valor de M se asume constante e igual a 1, las curvas con forma de campana corresponden a $n(t)$. Los valores de p y q para los que se presenta las gráficas se encuentran próximos a los valores promedio que Sultan, Farley y Lehmann (1990) reportaron basados en un análisis de la estimación de estos parámetros en 213 aplicaciones publicadas del modelo de Bass, $p=0.03$ y $q=0.38$

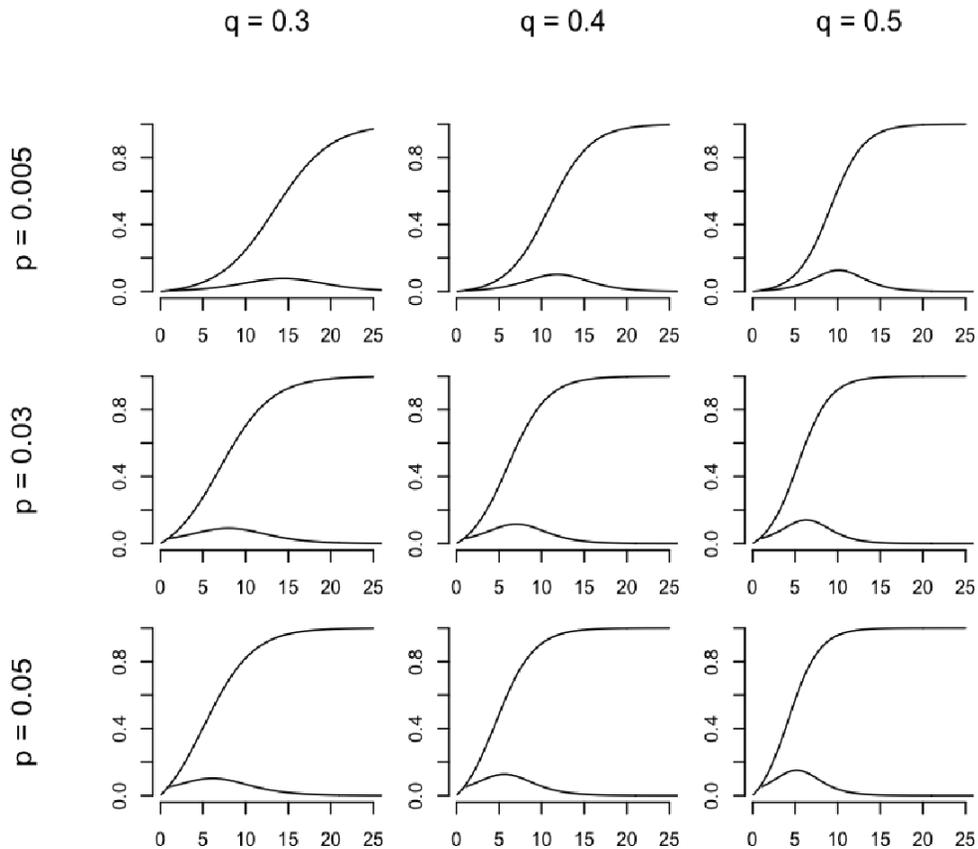


Figura 1: Curvas de adopción para $N(t)$ y $n(t)$ según el modelo de Bass, para $M=1$ y diferentes valores de p y q .

Fuente: tomado de: (Sultan, Farley, & Lehmann, 1990)

1.1.1.2. Extensiones del modelo de Bass

Con el fin de incorporar al modelo original de Bass, otros aspectos que reflejen la complejidad de los ambientes donde realmente se difunden las innovaciones, su formulación original ha sido extendida significativamente desde su introducción mediante diferentes contribuciones:

- Incorporación de la compra repetida, como por ejemplo en (Dodson & Muller, 1978).

- Incorporación de la dinámica de mercados potenciales, como por ejemplo en (Mahajan & Muller, Innovation Diffusion and New Product Growth Models in Marketing, 1979).
- Incorporación de la incertidumbre sobre el valor de la innovación, como por ejemplo en (Kalish, 1985).
- Incorporación del voz a voz negativo, como por ejemplo en (Mahajan & Muller, 1979).
- Incorporación de la voz a voz que cambia sistemáticamente en el tiempo, como por ejemplo en (Easingwood, Mahajan, & Muller, 1983).

A parte de las anteriores, también se han incorporado al modelo factores como la publicidad, las restricciones de producción o suministro de los productos, la oferta de productos sustitutos o complementarios y además variables como el precio del producto.

1.1.1.3. Fortalezas de los modelos agregados

Una de las principales ventajas del paradigma de modelamiento agregado es que proveen un mecanismo parsimonioso y analítico para obtener una visión de todo el mercado e interpretar su comportamiento; estos modelos hacen uso de datos del mercado (más fáciles de obtener que los datos de los individuos) para pronosticar las ventas de nuevos productos. Asumiendo que se cuenta con suficientes datos de las ventas tempranas de un producto dado, estos modelos pueden ser ajustados para obtener estimaciones de los parámetros que intervendrán en el lanzamiento de unos nuevos. En el caso del modelo de Bass, la

amplia investigación realizada al respecto ha aportado métodos maduros de estimación, como es el caso de:

- Mínimos cuadrados (Bass F. , 2004)
- Máximo de probabilidades (Schmittlein & Mahajan, 1982)
- Mínimos cuadrados no lineales (Srinivasan & Mason, 1986)
- Algoritmos genéticos (Venkatesan, Krishnan, & Kumar, 2004)

Cabe anotar que el modelo de Bass ha demostrado ajustarse muy bien a datos históricos de procesos de difusión completos, por lo que ha tenido un excelente desempeño como método de *Backcasting* o retrospección.

1.1.1.4. Limitaciones de los modelos agregados

En la literatura se han reportado varias limitaciones de los modelos agregados en general y como es lógico del modelo de Bass en particular

Limitación del poder predictivo: dado que el poder predictivo del modelo depende de la confiabilidad de la estimación de sus parámetros asociados, para el momento en que se tienen suficientes datos como para tener una estimación confiable, ya es demasiado tarde para usarlos con propósitos de pronóstico (Mahajan, Muller, & Bass, 1990)

Limitación del poder explicativo: los modelos agregados parsimoniosos no están basados en aspectos comportamentales, su formulación está gobernada por la necesidad de tener una solución matemática, lo que los puede llevar a incluir suposiciones que no son muy realistas. Por esta razón, no es sorprendente que estos modelos no puedan reproducir algunos de los patrones complejos de difusión que existen en el mundo real, en el que existen fenómenos como: las

innovaciones fallidas, las innovaciones con oscilaciones, y colapsos que innovaciones que inicialmente son exitosas (Strang & Macy, 2001; Maenhofner & Finholt, 2002).

Limitación potencial para considerar población heterogénea: la forma matemática de los modelos agregados, en general, adopta la suposición del modelo de Bass de una población homogénea de adoptantes potenciales, lo que puede ser considerado como una simplificación significativa, ya que la población de adoptantes potenciales típicamente es heterogénea, pues está diferenciada por factores como el ingreso económico de los individuos, las preferencias personales, la información sobre la innovación con que cada individuo cuenta y en última instancia el nivel en que cada individuo es propenso o no a adoptar la innovación (Tanny & Derzko, 1988; Chatterjee & Eliashberg, 1990; Bemmaor, 1992; van den Bulte & Stremersch, 2004).

Limitación para modelar las estructuras de interacción social: debido a la estructura parsimoniosa de los modelos agregados, en estos no es posible distinguir claramente los efectos de los diferentes procesos de interacción social, por ejemplo, en el modelo de Bass el parámetro de influencia interna p generalmente se asocia al voz a voz, pero también puede involucrar efectos de imitación como el aprendizaje y la presión social u otros efectos propios de las redes sociales (van den Bulte & Stremersch, 2004). Adicionalmente, en los modelos como el Bass, se hacen suposiciones muy específicas con sobre la estructura de interacciones sociales, como suponer que la población objetivo está totalmente conectada y que cada individuo puede influenciar directamente a cualquier otro en la misma población (Shaikh, Rangaswamy, & Balakrishnan, 2006).

Modelos de la dinámica de sistemas

Con el fin de vencer algunas de las limitaciones de los modelos mencionados en la sección anterior, y proveer a los gestores de la innovación de herramientas que pudieran abordar mejor las complejas interacciones entre los individuos de una población de potenciales adoptantes, se crearon los modelos de difusión de la innovación basados en la dinámica de sistemas. A continuación, se presentan las principales características de estos modelos, además de la formulación del modelo de Bass en la dinámica de sistemas y otros modelos reportados la literatura sobre este tema.

1.1.1.5. Características de los modelos de dinámica de sistemas

Del mismo modo que los modelos parsimoniosos de difusión de la innovación, los modelos de dinámica de sistemas funcionan a un nivel macro de análisis, y no modelan explícitamente el comportamiento de los individuos; no obstante tienen la capacidad de considerar una amplia gama de elementos estructurales que intervienen en el proceso de difusión de la innovación y que no pueden ser abordadas simultáneamente en los modelos tradicionales como lo son (Maier, 1998):

- La estructura del mercado (mercado de monopolio, oligopolio o dinámico)
- Factores directamente afectados por las decisiones gerenciales (precio, publicidad, calidad)
- Aspectos generales que cambian la estructura del mercado (sustitución entre generaciones sucesivas de productos, la posibilidad de la ocurrencia de compras repetidas, los cambios en el mercado potencial a través del tiempo, la voz a voz negativa)
- El proceso de difusión de la innovación como tal

Los modelos difusión de la innovación basados en dinámica de sistemas, típicamente conciben todos sus elementos como variables

endógenas propias del mercado, más que parámetros exógenos del modelo (Milling, 1996).

1.1.1.6. El modelo de Bass desde la dinámica de sistemas

En los modelos de dinámica de sistemas que implementan el modelo de Bass, el estado del mercado está dado por dos variables: el mercado potencial restante N_t y el número de adoptantes restante X_t , las ventas en un periodo determinado están dadas por la adopción generada tanto por los innovadores como por los imitadores, la cual incrementa el número de adoptantes y simultáneamente reduce el mercado potencial restante. Esta estructura de ciclos de refuerzo positivo y realimentación negativa de balanceo es característica del enfoque de dinámica de sistemas, la forma básica de este modelo se muestra en la Figura 3 a través de un diagrama de flujos y niveles. Los diagramas de flujos y niveles son una herramienta típica de la dinámica de sistemas y se usan para ilustrar la forma en los niveles, entidades que son acumuladas o decumuladas a través el tiempo, son influenciados e interconectados por los flujos, es decir por unas tasas de cambio.

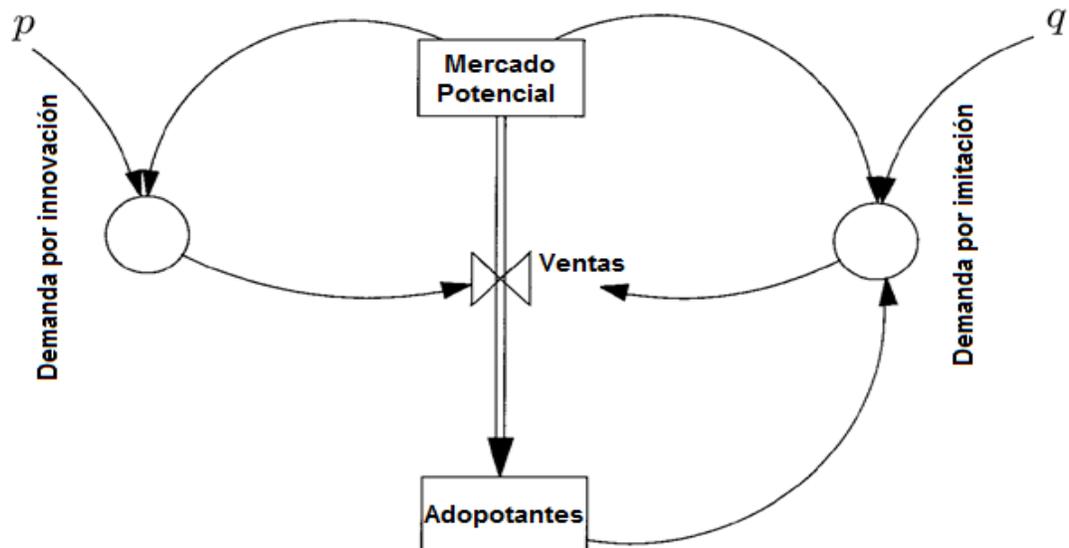


Figura 2: Diagrama de flujos y niveles de dinámica de sistemas para el modelo de Bass.

Fuente: Adopción a partir de (Maier, 1998)

En este diagrama el estado del mercado está determinado por los dos niveles: “Mercado potencial” que corresponde a N_t y “Adoptantes” que corresponde a X_t ; El flujo entre ellos, es decir “Ventas” está determinado a su vez por dos ciclos:

- El ciclo de demanda por innovación, que está dado por pN_t
- El ciclo de demanda por imitación, que está por $\frac{x_t}{M}qN_t$, donde M denota el mercado potencial

En general los modelos de dinámica de sistemas son implementados a través de herramientas de software especializadas para que sean ejecutados por un computador, para el caso de aquellos basados en el modelo de Bass, al ser ejecutados permiten graficar el número de adoptantes resultado la típica curva de adopción en forma de campana y una curva sigmoidea para el número acumulado de adoptantes.

1.2. Modelos desagregados de la difusión de la innovación

Si bien los modelos agregados de difusión de la invocación pueden pronosticar la respuesta general de un mercado en un tiempo t , típicamente a través del número de adoptantes que adquieren una innovación, los modelos desagregados abordan específicamente las decisiones de innovación a nivel de individuo, y determinan la respuesta de un mercado mediante la agregación o sumatoria de la demanda de consumidores individuales que no necesariamente son homogéneos y que no son meramente transmisores de información (Mahajan & Muller, 1979); en lugar de eso, toman decisiones deliberadamente de forma independiente. En este sentido, los modelos desagregados están mucho más basados en el comportamiento de los individuos que los modelos agregados que investigan la relación entre variables a un nivel macro.

Los modelos desagregados de difusión de la innovación se pueden dividir en tres grandes categorías: modelos microeconómicos, modelos estocásticos de selección de marcas y los modelos de simulación basada en agentes los cuales han aparecido más recientemente.

1.2.1. Modelos microeconómicos

Los modelos microeconómicos típicamente asumen que los consumidores individuales tienen un comportamiento como el descrito en las teorías de la micro económica, por ejemplo, la teoría neoclásica del consumidor (Mahajan & Muller, 1979). La mayoría de estos modelos fueron introducidos antes de que se masificara el acceso al poder de cómputo que facilitó los análisis numéricos a gran escala, por lo que, para aprovechar el valor analítico de los modelos microeconómicos, tradicionalmente se requiere hacer suposiciones específicas sobre las distribuciones estadísticas de los atributos de la población en la que se difundiría la innovación. Ejemplos típicos éste tipo de modelos se pueden encontrar en trabajos como (Hiebert, 1974; Feder & O'Mara, 1982; Jensen R. , 1982; Oren & Schwartz, 1988).

Aunque los modelos microeconómicos son valiosos, la mayoría de ellos pueden no aplicarse directamente a la modelación o al pronóstico de los procesos de difusión ya que no proveen explícitamente una función asociada a la difusión, pues su foco está exclusivamente en un nivel micro.

1.2.2. Modelos estocásticos de selección de marcas

Estos modelos describen la probabilidad estadística con que los individuos seleccionan una marca a través de modelos probabilísticos multinomiales. Los modelos clásicos de este tipo, ofrecen una imagen estática de la forma en que los consumidores realizan sus selecciones, generalmente sobre un conjunto de productos o marcas conocidos, y por lo tanto su principal campo de aplicación ha sido el estudio de mercados en equilibrio. No obstante, también se han propuesto modelos dirigidos a introducir un análisis dinámico para estudiar situaciones en que los consumidores se enfrentan a conjuntos de productos o marcas que incluyen algunos que no les son familiares, y sobre los cuales se han creado expectativas de su valor a partir sólo de

información limitada. Ejemplos típicos éste tipo de modelos se pueden encontrar en (Meyer & Sathi, 1985) y (Roberts & Urban, 1988).

Los modelos mencionados pueden ser aplicados en casos en que las innovaciones introducidas se ajustan a una categoría de producto ya existentes, sin embargo, poseen una aplicabilidad limitada en la difusión de innovaciones radicales con las que los consumidores no tienen familiaridad ya que no contemplan mecanismos elementales de difusión como la comunicación.

1.2.3. Modelos basados en agentes

Los modelos desagregados ya citados también poseen sus propias limitaciones, ya que giran alrededor de suposiciones específicas sobre las características de los consumidores a nivel individual, además no pueden capturar los fenómenos no lineales que típicamente emergen de la interacción de los individuos en los procesos de difusión, ni tampoco tienen la capacidad de incorporar heterogeneidad en los enlaces que conectan a los individuos que hacen parte de la red social en donde se desarrollan estos procesos (Roberts & Urban, 1988). Los modelos de simulación basados en agentes (ABMS), constituyen un enfoque que puede potencialmente superar estas limitaciones, así como también las mencionadas para los modelos agregados que fueron descritas en la sección 1.1.1.4.

La modelación basada en agentes (en adelante ABM por sus siglas en inglés) tiene sus orígenes en la modelación de autómatas celulares, un enfoque con larga tradición en las ciencias sociales que se remonta al menos hasta el modelo de dinámica de segregación de Schelling (1971). Más recientemente, las bases de la -ABM- fueron sentadas en la teoría de los sistemas complejos adaptables, según se propone en la obra “El orden oculto: como la adaptación crea la complejidad” (Holland, 1995), en ella se establecen las características de los Sistemas Complejos Adaptables -SCA-, así:

- **Bloques de construcción:** mecanismo para la construcción de modelos internos
- **Marbetes:** Mecanismo que facilita la interacción selectiva permitiendo la construcción de agregados
- **Modelos internos:** Mecanismo para el surgimiento de patrones de comportamiento
- **Diversidad:** Propiedad que explica el surgimiento de novedades a partir de las interacciones entre agentes
- **Agregaciones:** Propiedad que explica la recombinación de categorías similares
- **Flujos:** propiedad que explica la interacción entre nodos de la red
- **No linealidad:** propiedad en la cual el comportamiento de todos es mayor que la suma de las partes

Estas características pueden identificarse como presentes en los procesos de difusión de la innovación, cuando estos incluyen como factor clave la heterogeneidad de individuos, lo que los hace en sí mismos un SCA.

La -ABM- es un estilo de modelación en el cual los individuos de un sistema y sus interacciones se representan de manera explícita, los individuos pueden ser por ejemplo: personas, animales, grupos o células o incluso entidades que no tienen una forma física. En el caso de la aplicación de -ABM- en los procesos de difusión de la innovación, estos individuos vienen dados por la población de posibles adoptantes de

la innovación, sean personas comunes, consumidores, gobiernos e incluso empresas, lo que permite representar con libertad su heterogeneidad.

1.2.3.1. Modelación de la heterogeneidad de individuos

El enfoque más común para abordar la heterogeneidad de individuos en un proceso de difusión de la innovación, es modelarla como una propiedad intrínseca de cada agente que está relacionada al nivel en que éste es propenso a adoptar la innovación, a dicha propiedad se le asignan valores heterogéneos generalmente usando una distribución de probabilidad determinada.

Uno de los primeros estudios de simulación que investigó la heterogeneidad de esta manera fue el realizado por Golderberg y Efroni (2001), en su trabajo se propuso un modelo autómatas celular donde las células estaban caracterizadas por un umbral de adopción al que se asigna aleatoriamente un valor entre cero y uno, el cual se interpreta como la “expectativa de calidad” del individuo. La distribución de una innovación para valores fijos y variables de la “expectativa de calidad” se modela en una matriz sobre la cual las células deciden adoptar sólo cuando un número suficiente de células adyacentes ha adoptado. Los resultados obtenidos mostraron fuertes fluctuaciones en la adopción observada y sugirieron que la heterogeneidad podría tener un fuerte impacto sobre la difusión de la innovación.

Delre y otros (2007; 2010) también usaron umbrales de adopción heterogéneos en sus modelos, pero los interpretaron como “nivel de aspiración de utilidad” y lo representaron como la suma ponderada de dos funciones de umbral separadas: el umbral de utilidad social y el umbral de utilidad basado en la “expectativa de calidad” de los agentes. Encontraron que incrementar la heterogeneidad aceleraba la difusión dado que la masa crítica se alcanzaba más rápido que en poblaciones homogéneas.

Alkemade y Castaldi (2005) fueron más allá de representación de la heterogeneidad a través de la diversidad de los umbrales de adopción de los individuos, en su trabajo introdujeron un umbral de sobre-exposición a la innovación a fin de incorporar la idea de que algunas innovaciones se dejan de considerar atractivas como factor diferenciador de los agentes, “Dejan de estar de moda”, cuando el número de adoptantes se hace demasiado grande. Con este enfoque, un agente adopta la innovación cuando la porción de adoptantes con los que se relaciona se encuentra por encima del umbral de adopción, pero se mantiene por debajo del umbral de sobre-exposición. La heterogeneidad se representa asignando el umbral de adopción a través de una distribución uniforme a la que se le suma un valor fijo para obtener el umbral de sobre-exposición. Este trabajo presenta cómo se incorpora la heterogeneidad en el modelo construido por ellos, pero no analiza el efecto que tiene sobre la difusión de la innovación la variación del grado de heterogeneidad.

De Wildt (2015) realizó un estudio del impacto de la heterogeneidad usando modelos de simulación y distinguió cuatro tipos: aquella relacionada con el nivel en que un individuo es propenso a adoptar la innovación, aquella relacionada con cuánto se está dispuesto a pagar por la innovación, aquella relacionada con el comportamiento comunicacional y aquella relacionada con características individuales de los adoptantes. Adicionalmente concluyó que en sus experimentos la inclusión de éste último tipo de heterogeneidad, permitía mostrar que el proceso de toma de decisiones de los adoptantes se aproxima a los principios de racionalidad limitada propuesta por Herbert A. Simon (1985), y que la información provista por otros adoptantes influye fuertemente la toma de decisiones.

1.2.3.2. Modelación del comportamiento de los adoptantes

El elemento principal de los modelos de difusión basados en agentes es la representación explícita del proceso de toma de decisiones de los individuos, y

específicamente de aquel relacionado con adoptar o no adoptar una innovación. Para lograr representar este comportamiento se han desarrollado una variedad de enfoques, los cuales se pueden agrupar en seis categorías en función del modelo particular de reglas que los agentes aplican en el proceso de toma de decisiones: modelos basados en la optimización matemática, modelos basados en la economía, modelos de agentes cognitivos, modelos heurísticos, modelos basados en la estadística y modelos de influencia social (Zhang & Vorobeychik, Empirically grounded agent-based models of innovation diffusion: a critical review, 2019).

Modelos basados en la optimización matemática

Los modelos basados en la optimización matemática plantean que los agentes toman decisiones manera deliberada y usan sofisticadas herramientas de planeación matemática para valorar las posibles consecuencias de sus acciones. En estos modelos, aunque los agentes pueden llegar enfrentarse con limitaciones como la incertidumbre, información incompleta y otras restricciones, sus decisiones finales de adopción de una innovación son determinadas por objetivos concretos de optimización, lo que hace que su uso sea generalmente justificado por el hecho de que algunos adoptantes como los granjeros frecuentemente toman sus decisiones de innovación en términos de retorno económico.

Modelos basados en la economía

A diferencia de los modelos basados en la optimización matemática, los modelos basados en la economía usan reglas más simples con un menor número de restricciones y de variables a considerar, generalmente esto se refiere a minimizar los costos, maximizar los beneficios o la utilidad personal. Su uso es común en casos en que las decisiones de adopción de una innovación están principalmente motivadas por razones económicas, aunque puedan existir razones adicionales como las del cuidado del medio ambiente, la seguridad u otras más, como ocurre

con las tecnológicas de energías renovables: energía solar y biocombustibles entre otros.

Modelos de agentes cognitivos

Mientras los modelos basados en la optimización matemática y los modelos basados en la economía abordan aspectos cuantitativos del proceso de toma de decisiones de los adoptantes, e integran efectos básicos de comparación de umbrales numéricos, los modelos de agentes cognitivos apuntan a modelar explícitamente la forma en los individuos se afectan uno a otros en términos cognitivos y psicológicos como lo son: la opinión, la actitud y la emoción. Esta categoría incluye modelos de acuerdo relativo, modelos basados en la teoría del comportamiento planificado y el modelo Consumat, los cuales serán abordados con más detalle el capítulo 2.

Modelos heurísticos

Este tipo de modelos generalmente se usan cuando los modeladores no consideran adecuada ninguna teoría establecida para la toma de decisiones de los agentes en una aplicación específica bajo estudio, estos modelos tienen a dar la impresión de ser contruidos a la medida ya que en general no poseen una teoría reconocida que los soporte, lo que trae como consecuencia que no se cuente con medios preestablecidos para estimar los parámetros del modelo, por lo que generalmente éstos se seleccionan de modo que la salida del modelo se aproxime a la de un proceso de adopción que fue observado en la realidad.

Modelos basados en la estadística

Estos modelos se basan en métodos estadísticos para inferir cómo será la decisión de adopción de los individuos a partir de un conjunto de sus características observables, las reglas construidas utilizando este enfoque luego son integradas

al mecanismo de toma de decisiones de adopción de un modelo basado en agentes. Para el caso específico de los modelos aplicados la difusión de la innovación, esta categoría de modelos incluye el análisis cojoint, modelos de selección discreta y aprendizaje de máquinas.

Modelos de influencia social

Estos modelos se enfocan en la manera en las distintas formas de influencia social afectan las decisión de adopción de los individuos, sea el efecto de los pares, la imitación o cualquier otra. Han tenido un importante desarrollo en los últimos años como consecuencia de la disponibilidad de datos que permiten las redes sociales, a partir de las cuales, si se tiene las autorizaciones adecuadas se pueden conocer las relaciones que un cada individuo posee en la red social y cuál fue su comportamiento de adopción. Modelos de este tipo han sido usados para analizar los datos de adopción de herramientas como Skype y algunas aplicaciones de Facebook.

Finalmente, sin importar el tipo particular de modelo que se utilice en la ABM, cualquier de ellos permitirá aprovechar fácilmente el poder de cómputo para realizar simulaciones y de este modo capturar los fenómenos emergentes que surgen en los sistemas complejos a un nivel macro. En el caso de los procesos de difusión de la innovación esto significa que es posible experimentar con los ajustes de los modelos construidos y explorar el impacto que estas pueden tener en el comportamiento del proceso de difusión, una ventaja que ha sido explotada recientemente, en especial para la orientación de las decisiones políticas (Zhang & Vorobeychik, Empirically grounded agent-based models of innovation diffusion: a critical review, 2019).

1.3. El teletrabajo

La adopción del teletrabajo como proceso de innovación es definido como una modalidad de trabajo que mediante el uso de las tecnologías de la información y comunicación

posibilita a que los empleados puedan realizar sus actividades laborales de tiempo parcial o total por fuera de las instalaciones de la organización (Shaikh, Rangaswamy, & Balakrishnan, 2006; Shin, Sawy, Sheng, & Higa, 2000; Daniels, Lamond, & Standen, 2001; Garrett & Danziger, 2007).

Adicionalmente, el teletrabajo está definido principalmente en las siguientes dimensiones:

Lugar de trabajo: el trabajo puede ser llevado a cabo desde cualquier locación diferente a las instalaciones de la organización, como desde el hogar del empleado (teletrabajo a domicilio), desde localizaciones itinerantes como aeropuertos y hoteles entre otros. También se puede desarrollar desde centros especializados provistos de tecnologías de la información y la comunicación, los cuales son utilizados para minimizar los desplazamientos entre la organización y el domicilio de los empleados, como es el caso de los telecentros (Sharit, y otros, 1998).

El uso de las tecnologías de la información y comunicación (TIC): las actividades y laborales específicas del trabajo deben estar mediadas tecnológicamente tanto a nivel operativo como comunicativo con el fin de poderse considerar cómo entorno de teletrabajo en la organización (Daniels, Lamond, & Standen, 2001; Garrett & Danziger, 2007);

El tiempo: la cantidad de tiempo empleado en las diferentes locaciones, el cual puede ser de tiempo parcial o de tiempo completo, al alternarse entre las diferentes modalidades locativas y los espacios de la organización

Relación contractual: relación contractual entre el empleador y el empleado, se puede presentar la relación contractual directa, aquella donde el empleado es contratado directamente por la organización y tiene todos los beneficios que esta le puede proporcionar a sus empleados, también se puede presentar la relación de naturaleza *FreeLancer*, donde el empleado es independiente pero existen una relación contractual entre ambas partes con beneficio económico (Garrett & Danziger, 2007).

En el caso puntual de la tecnología de teletrabajo SAROFI, se trata de una herramienta que le permitía a los empleados, profesores y estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia acceder remotamente a los computadores que tenían asignados en las instalaciones de la Universidad, sean computadores de escritorio, computadores que gestionan equipos de laboratorio y computadores que tienen instalado software especializado entre otros. De esta forma se aportaba a mejorar la productividad no solo de los equipos informáticos adquiridos por la Universidad sino también del personal que hace uso de ellos. Es importante anotar que el uso de este servicio no era obligatorio y estaba completamente a discreción de las personas que desearan hacer uso de él, sin estar limitado a una franja horaria específica de utilización, o a unas ubicaciones desde donde era permitido hacer uso del servicio, por lo que la adopción de esta tecnología se dio por la libre elección de los adoptantes.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presenta una revisión de los trabajos publicados sobre modelos basados en agentes aplicados a simular procesos de difusión de la innovación. Se tomó como base la revisión realizada por Keisling y otros (2012), además del trabajo de Zheng y Vorobeychik (2019), al cual se realizan algunas mejoras y se actualiza. En consecuencia los trabajos son agrupados usando como criterio el mecanismo que utilizan para modelar el comportamiento de los adoptantes, tal y como se presentó en la sección 1.2.3.2.

2.1. Modelos basados en la optimización matemática

En uno de los trabajos iniciales en este campo, Berger (2001) desarrolló un modelo espacial multi-agente de programación matemática (en adelante PM) aplicado a la difusión de innovaciones agrícolas en Chile. Se usó la programación lineal para modelar la producción, el consumo, la inversión y las decisiones de mercado de cada familia, con el objetivo de maximizar su ingreso esperado, sujeto a las restricciones de disponibilidad de tierra y agua.

El modelo construido, de acuerdo a la literatura sobre difusión de la innovación que ya existía para el momento de su creación, incorpora la experiencia pasada, tanto del individuo como de sus pares, esto se logra supeditando el cálculo del ingreso esperado para una familia, a al hecho de que el nivel de adopción de los pares alcance un nivel predeterminado, adicionalmente las interacciones de los agentes reflejan los cambios producidos por la disponibilidad de los recursos de tierra y agua. En la implementación realizada del modelo para realizar simulaciones, los agentes son representados mediante autómatas celulares, con células asociadas a atributos biofísicos y económicos como: calidad de la soya, suministro de agua, nivel de utilización de la tierra, costos de transporte interno, y productividad marginal.

En este modelo, las propiedades los agentes se inicializan usando datos distintas fuentes, incluyendo encuestas que capturan de características agrícolas y socio económicas, además de conjuntos de datos geográficos con información sobre la distribución de la

tierra y el recurso hídrico. Los parámetros de este modelo fueron calibrados en términos de la cercanía entre los experimentos de simulación y los datos agrícolas recolectados, mientras que la validación se realizó mediante la regresión de los resultados del uso de la tierra obtenidos usando el modelo contra el uso real de la tierra que fue observado en los datos. A pesar de que en este trabajo se reporta la pendiente de las regresiones, la validación del modelo no es completa, dado que sólo se realiza para algunos años y no se realizó con datos diferentes a los usados en la calibración, lo genera una debilidad. Posteriormente, en Berger (2007), aplicaron el enfoque PM en la modelación basada en agentes al estudio de la complejidad del uso del agua en Chile, sin embargo este trabajo aun tenía las mismas debilidades de validación.

Schreinemachers et al., (2007), también adoptaron el enfoque basado en PM para simular la fertilidad de la soya y la dinámica de la pobreza en Uganda, analizando el impacto que tiene sobre estas el acceso a crédito de corto plazo y las tecnologías alternativas. El modelo construido se centra en proceso de toma decisiones de los granjeros y el rendimiento de los cultivos, pudiéndose encontrar en él tres componentes: 1. Un conjunto de posibles decisiones relacionadas con la agricultura, como sembrar nuevos cultivos, criar ganado o comprar y vender productos agrícolas; 2. Una función de utilidad que determina que tanto contribuirá una decisión a los objetivos del agricultor; 3. Una serie de relaciones entre las variables de decisión, las cuales son representadas por un conjunto de ecuaciones. Siguiendo lo propuesto por Berger (2001), en este modelo definió un flujo de tres etapas para separar la toma de decisiones de los agentes en: inversión, producción y consumo. Las propiedades de los agentes granjeros como la calidad y la cantidad de tierra, mano de obra, ganado, cultivos permanentes y conocimiento sobre innovación, se mapean de distribuciones empíricas basadas en muestras limitadas.

En lo relativo la difusión de la innovación, la influencia de los pares se captura de la misma manera que en Berger (2001) , pero con la diferencia de que en este caso el umbral de adopción de cada agente se establece a partir de datos de una encuesta aplicada a los granjeros. El modelo construido por estos autores fue sistemáticamente validado en tres

pasos: primero se realizó una validación econométrica para asegurar su precisión, luego cada componente fue validado independiente y finalmente se validó el sistema como un todo. De forma similar a lo que ocurrió en Berger (2001), la validación se realizó utilizando los mismos datos de la calibración.

Schreinemachers et al., (2009) analizaron la difusión de la agricultura de invernadero usando como caso de estudio la pimienta campana en las tierras altas del norte de Tailandia, su trabajo sigue el enfoque PM de Berger (2001), y en consecuencia el umbral de adopción de los individuos también se calibró a través de encuestas aplicadas a los granjeros, para lo cual primero se calcula la probabilidad de adopción de cada agente, a partir de variables observables que se organizan y se dividen en 5 categorías siguiendo a Rogers (2003). La validación del modelo presentado en este trabajo se realizó mediante la verificación del coeficiente de correlación R^2 arrojado por la regresión del uso de la tierra respecto de las predicciones generadas por las simulaciones. Esta forma de validación adolece de las mismas debilidades observadas en otros trabajos ya que se usa el mismo conjunto de datos, tanto para la calibración como para la validación.

Schreinemachers et al., (2010) aplicaron también el enfoque de la PM para estudiar el impacto de varias innovaciones de la agricultura en la productividad de los cultivos de lychee en el norte de Tailandia, en este trabajo a diferencia del reportado en Schreinemachers et al., (2009) el umbral de adopción de los individuos se asignó aleatoriamente debido a la falta de datos relevantes que permitieran otra forma de estimación. La validación del modelo reportado se realizó del mismo modo que en Schreinemachers et al., (2009) y aunque no el comportamiento de los agentes a nivel individual no se capturó en detalle, se concluyó que el modelo representa razonablemente el comportamiento agregado de los agentes.

Alexander et al., (2013) desarrollaron un modelo basado en agentes del mercado de cultivos energéticos (cultivos que se utilizan únicamente por su energía) perennes en el

Reino Unido, con el fin de analizar la dinámica tanto en el espacio como en el tiempo de la adopción de los cultivos energéticos en ese país.

El modelo construido incluye la interacción del suministro y la demanda de dos grupos de agentes: los granjeros y los inversionistas en plantas de biomasa. Los granjeros tienen ubicaciones fijas en el espacio, lo que determina el clima, la calidad de la tierra a la que tiene acceso, y en consecuencia al rendimiento de sus cultivos, lo que finalmente decide la selección de los cultivos que plantan mediante un enfoque de dos etapas similar al presentado en Berger (2001), donde un granjero sólo se considera la decisión de adopción si una porción determinada de sus vecinos ha tenido una experiencia positiva con los cultivos energéticos, y la decisión como tal se toma a través de un esquema de PM llamado *farm scale* que busca la mejor confinación de semillas que maximiza la utilidad del granjero, como se describe en Alexander et al. (2014).

La calibración del modelo construido en este trabajo se realizó contra datos empíricos y por referenciación con estudios anteriores, mientras que la validación implicó la verificación del modelo con configuraciones simples, pruebas unitarias de los componentes del modelo y la comparación de los resultados de las simulaciones con datos empíricos. Sin embargo, al igual que otros casos la calibración y la validación no usaron conjuntos de datos independientes.

2.2. Modelos basados en la economía

2.2.1. Minimización de costo

Faber et al., (2010), desarrollaron un modelo basado en agentes para la difusión de tecnológicas energéticas, en donde las alternativas micro-CHP (del inglés Combined Head and Power) y las calderas de condensación compiten por la demanda de los consumidores, quienes son representados como agentes en el Modelo. Estos agentes se clasifican según su tipo de vivienda, puesto que este factor determina

principalmente determina sus requerimientos de gas natural por unidad de calefacción.

Cada vez que un agente considera comprar una nueva unidad de calefacción sigue su proceso de decisión de 3 etapas: 1 Valorar si realmente necesita una nueva unidad, 2 revisar el mercado en busca de unidades “visibles” para lo cual la publicidad y la “conciencia tecnológica” juega un papel importante, y 3 cada consumidor selecciona de entre aquellas unidades que son “visibles” la que posee el menor costo. Es de anotar que en este modelo el costo es una variable que se depende de la clase social del consumidor, el precio de compra, los subsidios a los que tiene acceso, y el costo de operación de la unidad durante el tiempo esperado de vida útil de su tecnología. La calibración de los parámetros de este modelo se realiza principalmente a través de datos empíricos.

Con respecto a la validación, se realizaron algunas actividades que incluyeron la aplicación de análisis de sensibilidad sobre variables como el tamaño del mercado, la tasa de progreso, y el tiempo de vida útil de la tecnología. Sin embargo este trabajo no reporta explícitamente el uso de datos empíricos en su validación.

Mohandes et al., (2019) desarrollaron un modelo basado en agentes para estudiar la adopción de la energía fotovoltaica en el golfo pérsico, específicamente en el estado de Qatar orientado a evaluar la adopción de esta tecnología en los hogares sobre distintos escenarios de incentivos y de regulaciones. Los agentes, hogares en este caso, evalúan el costo de su consumo de energía de fuentes tradicionales y el costo que tendría si adoptan la energía fotovoltaica, la adopción ocurre a través de un modelo probabilístico que dispara la probabilidad de adopción cuando el costo del consumo de energía fotovoltaica es mejor que el asociado a la energía de fuentes tradicionales. Aunque en este trabajo se usaron datos considerados confiables que fueron reportados con la campaña de censo del estado de Qatar y Dubai Electricity and Water Authority, no se reportan actividades de validación del modelo.

2.2.2. Maximización de las ganancias

Sorda et al., (2011) desarrollaron un modelo basado en agentes para investigar la generación de energía de plantas CHP (del inglés Combined Head and Power) de biogás en Alemania. En este caso, en lugar de simular la decisión individual de los individuos sobre si invertir o no en el biogás, el modelo resuelve un problema de optimización que abarca todo el sistema, y lo hace desde la perspectiva de un planificador global, además posee dos tipos de agentes: primero los agentes de información que incluyen el gobierno federal, la banca y los fabricantes de plantas de generación de energía, y segundo los agentes que toman decisiones de inversión que incluyen los proveedores, el distrito, los tomadores de decisiones y los consumidores de calefacción.

El corazón de este modelo está el proceso de toma de decisiones de los agentes, que actúan como representantes de los inversionistas en cada comunidad y solo deciden invertir si ocurre que existen suficientes recursos disponibles y además el análisis de la inversión arroja un valor presente neto positivo (rendimientos financieros). Este trabajo utilizó múltiples fuentes de datos para construir el modelo de simulación, por ejemplo, se utilizaron las guías operación de plantas de biogás y las especificaciones del fabricante para obtener detalles de sus características y funcionamiento, lo que le infiere un grado de validez, no obstante no el trabajo no reporta que el modelo haya sido validado cuantitativamente.

2.2.3. Maximización de la utilidad

Broekhuizen et al., (2011) desarrollaron un modelo basado en agentes del comportamiento del espectador de cine que incorpora la influencia social en las decisiones de selección de películas. Este trabajo investiga dos tipos de influencia social: la influencia del comportamiento pasado por parte de otros, y la influencia derivada de preferencias de los amigos de un individuo, como ocurre con la presión

de grupo para unirse a otros a fin de ver determinada película. El principal objetivo de este estudio es determinar la medida en que los dos tipos de influencia impactan la disparidad en el número de espectadores de las películas.

En este modelo la toma de decisión de los agentes tiene dos enfoques, uno probabilístico y el otro basado en la utilidad, en el enfoque probabilístico existe una cierta probabilidad de que un agente revise la oferta de películas disponibles, además existe también una probabilidad específica de que considere ver una película, y si lo hace selecciona de entre las que conoce, aquella que le provee la mayor utilidad esperada. La utilidad de una película en esta configuración, es la suma ponderada de la utilidad individual, lo que representa la alineación entre las preferencias individuales, características de la película, y la utilidad social que es una combinación de los dos tipos de influencia social citadas. Con respecto a la calibración de este modelo, algunos de sus parámetros se determinan teóricamente, otros se determinan de forma empírica, mientras que la variabilidad de los restantes es estudiada mediante análisis de sensibilidad.

Con respecto a la validación, se involucró una encuesta transnacional que permite medir la influencia social. Dado que esta validación utilizó un estudio basado en una encuesta independiente, es significativamente cualitativa.

Holtz y Pahl-Wostl (2011) desarrollaron un modelo basado en agentes, que a su vez funciona basado en la utilidad para estudiar cómo las características de los granjeros afectan los cambios en el uso del suelo en una región de España incluyendo las técnicas de irrigación. Dado que los datos relevantes en la materia son escasos, el modelo no puede ser calibrado ni validado de forma cuantitativa, en su lugar se usan datos empíricos para iniciar el modelo, lo que deriva en una distribución inicial de cultivos que permite validarlo cualitativamente.

En este modelo la utilidad del agente se calcula como una función Cobb-Douglas mediante la multiplicación de cuatro influencias: el margen bruto, el riesgo, la carga de mano de obra y las restricciones regulatorias, es de anotar que los parámetros

asociados a estas cuatro influencias cambian según los tipos de granjeros. En el proceso de toma de decisiones un agente escoge un patrón de uso del suelo que maximiza su utilidad, este patrón esta involucra, una combinación de cultivos y técnicas de irrigación que a su vez están restringidas por el marco regulatorio.

La difusión de las técnicas de irrigación se simula basándose en el concepto de que entre más ampliamente usada sea una tecnológica, más probable es que un granjero la considere para su uso. Los experimentos realizados en este trabajo exploran la importancia de cada tipo de granjero y tipo variable de influencia en la función de utilidad, mediante la comparación cualitativa de los resultados de simulación con los datos empíricos.

Plötz et al., (2014) propusieron un modelo difusión de los vehículos eléctricos en Alemania con el fin de evaluar el impacto de las políticas relacionadas con la movilidad eléctrica, su modelo toma como base datos de la conducción de vehículos recolectados en ese país, y a partir de ellos determina las cuotas de mercado por tipo de vehículo. Para lograrlo se simulan distintos perfiles de conducción para los agentes, tanto perfiles para vehículos eléctricos como para convencionales, y luego se selecciona aquel perfil que tenga asociada la mayor utilidad.

Para esta modelación de la toma de decisiones de los agentes, la utilidad está definida como una función del costo total de propiedad, la marca del vehículo eléctrico seleccionado y el deseo individual de pagar más, (en inglés willingness-to-pay-more –WTPM-), luego las decisiones individuales de los agentes se agregan para extrapolar las cuotas de mercado.

La validación de este modelo se realizó aplicándolo a la adopción de vehículos diésel y comparado su salida y las cuotas reales de mercado de este tipo de vehículos en diferentes ramas de la industria, aunque se trata de un proceso cuantitativo y riguroso, es de anotar que en éste no se usaron datos independientes. Finalmente, se debe observar que en este modelo no se tuvo en cuenta la influencia social, que

frecuentemente constituye un factor clave del modelado de la difusión de la innovación.

McCoy y Lyons (2014) desarrollaron un modelo basado en agentes para estudiar la difusión de los vehículos eléctricos en Irlanda, en él los agentes corresponden a hogares que son heterogéneos tal y como lo sugiere la diversidad de las características identificadas en ellos. Cada agente posee dos atributos estáticos: la utilidad asociada al ingreso -IU- y la utilidad asociada al medio ambiente -EU-, ambas se extraen de distribuciones empíricas derivadas de encuestas aplicadas a los hogares en ese país.

La -UI- está determinada por factores como la edad, la clase social del agente y el tipo de sus posesiones, mientras que la -UA- está basada en la adopción de tecnologías eficientes que el agente a realizado en el pasado y de su actitud hacia la protección del medio ambiente. Cada agente posee un umbral adopción único también es extraído de distribuciones empíricas y esta negativamente correlacionado con -IU-, un agente adopta si la utilidad total es mayor que este umbral, siendo esta utilidad general calculada como la suma ponderada de -IU-, -EU-, las preferencias individuales del agente y la influencia social a la que está sometido. Cabe anotar que en este modelo la inicialización de los agentes se realiza usando datos empíricos y algunas suposiciones de los autores, además de que no se reporta ninguna validación rigurosa.

Palmer et al., (2015) desarrollaron un modelo basado en agentes para la difusión de la energía fotovoltaica en los sectores residenciales de Italia, aquí la utilidad total de un agente está definida como suma ponderada de cuatro utilidades parciales: El periodo de retorno de la inversión, el beneficio ambiental, el ingreso económico del hogar y la influencia social. El agente decide invertir en la energía fotovoltaica si la utilidad total supera un umbral que es definido de forma exógena al modelo.

En este caso los parámetros del modelo se calibran tratando de ajustarse a los datos reales de la adopción agregada de la energía fotovoltaica en Italia en el periodo 2006 – 2011. Luego el modelo es aplicado al estudio de la difusión de la energía solar

fotovoltaica en Italia en el periodo 2012- 2016, sin embargo no se reportan datos de ningún proceso de validación cuantitativo del modelo.

2.3. Modelos de agentes cognitivos

2.3.1. Modelo de acuerdo relativo

El modelo de acuerdo relativo pertenece a la clase de los modelos de dinámica de opinión (Hegselmann & Krause, 2002) y aborda el problema de cómo la opinión y la incertidumbre se afectan por las interacciones personales. Deffuant et al., (2000) fue el trabajo seminal de este modelo por lo que también es conocido en la literatura como Deffuant.

Deffuant et al., (2002b) diseñaron un modelo basado en agentes para simular la conversión a la agricultura orgánica en Francia, con el fin modelar el impacto de las interacciones personales en las decisiones individuales, se basaron el modelo Deffuant, en el cual tanto la opinión como la incertidumbre son variables continuas. En su modelo de difusión, un agente (granjero) tiene un “estado de interés” con tres posibles valores: no-interesado, incierto e interesado, el cual es asignado a partir de la opinión del agente y algunas consideraciones económicas.

Luego de la asignación inicial del “estado de interés”, un agente puede cambiar de opinión después de discutir con algunos pares, un proceso para el cual se usa una variante del algoritmo del modelo de acuerdo relativo (Deffuant, Amblard, & Weisbuch, 2002). Cuando el “estado de interés” de un agente tiene asignado el valor “interesado” o “incierto”, él ejecuta una evaluación usando criterios económicos, y si aún continúa interesado solicita la vista de un técnico, después de la cual se repite la evaluación económica con el fin de reducir la incertidumbre.

La decisión final de adopción se toma cuando después de la vista del técnico y de la segunda evaluación económica, el agente se mantiene el estado “interesado” por un determinado periodo de tiempo. En el caso de este modelo, existe un amplio grupo

de parámetros que gobiernan el proceso de comunicación y decisión cuya asignación de valor está basada en datos empíricos, mientras que existe otro reducido grupo para los cuales no se reporta en qué se fundamenta la asignación de su valor. Los autores probaron la sensibilidad del modelo variando los valores de parámetros en ambos grupos, luego a partir de este paramétrico trataron de identificar zonas que eran compatibles con datos empíricos de la adopción de la agricultura orgánica.

2.3.2. Teoría del comportamiento planeado

La teoría del comportamiento planificado (en adelante TPB por su siglas en inglés) postula que la intención de un individuo sobre un el comportamiento es un predictor importante de si participarán en este comportamiento (Ajzen, 1991). Como resultado, la teoría identifica tres atributos que determinan conjuntamente la intención: actitudes, normas subjetivas y control conductual percibido. La contribución relativa de cada predictor está representada por un peso que a menudo se aplica empíricamente mediante análisis de regresión sobre datos de encuestas.

Kaufmann et al., (2009) construyeron un modelo basado en agentes inspirado en la TPB para estudiar la difusión de la agricultura orgánica en dos países de la unión europea, fieles a la metodología TPB cada agente es caracterizado por tres atributos: actitudes, normas subjetivas y control conductual percibido, cada uno tomando valores entre -1 y 1. La intención entonces es definida como la sumatoria del valor de cada uno de estos parámetros multiplicada por el peso que le hubiera sido asignado, los pesos asociados a adoptantes y no adoptantes se calculan separadamente a través regresiones lineales sobre datos obtenidos de encuestas. Un agente decide adoptar cuando el cálculo de su intención individual supera un límite establecido, de otro modo no adopta. En el caso de este modelo, se reporta el uso de datos empíricos para realizar su calibración de sus parámetros, pero no se provee información de su validación cuantitativa.

Schwarz y Ernst (2009) propusieron un modelo basado de difusión basado en agentes para innovaciones que ahorran agua, el cual aplicaron en una determinada área

geográfica en Alemania. En este modelo, los agentes son hogares con ciertos estilos de vida, representados por características demográficas y de comportamiento, los cuales usan dos reglas de decisión diferentes para determinar la adopción: una regla de decisión cognitivamente exigente que representa una decisión deliberada, y una regla simple de decisión heurística.

La regla de decisión a usar por agente se selecciona según el tipo de agente y la categoría de la tecnología que se está difundiendo. El mecanismo que representa la decisión deliberada de los agentes, corresponde a un algoritmo basado en la maximización de la utilidad que toma en cuenta atributos como la actitud, las normas sociales y la percepción de control de comportamiento, mientras que el mecanismo que representa de decisión simple sólo toma en cuenta las características de la innovación y la norma social. El modelo se calibró utilizando datos de una encuesta de acuerdo con el marco TPB, y fue validado utilizando datos de investigadores independientes de mercado de hogares.

Rai y Robinson (2015) desarrollaron un modelo basado en agentes con soporte empírico para estudiar la difusión de los programas de reembolso por el uso de energía fotovoltaica (PV), el modelo está inspirado en la TPB y asume que hay dos elementos claves que determinan la decisión de adopción: la actitud y el control de comportamiento percibido.

El atributo de actitud de los agentes se calibra usando datos de encuestas y regresión estadística, además siguiendo el modelo de dinámica de opinión propuesto en (Deffuant, y otros, 2002b) la actitud de los agentes hacia la tecnológica y su nivel de incertidumbre se actualiza cada momento a través de la interacción social con sus vecinos siguiendo el protocolo del acuerdo relativo. Los agentes deciden adoptar cuando su actitud supera un umbral determinado de manera global para el modelo.

En este caso los parámetros del modelo son calibrados a través de un proceso interactivo de ajuste usando datos de adopción históricos, además este modelo fue validado inicialmente en términos de su precisión predictiva, comparando la adopción

predicha por él contra el nivel de adopción empírica para un periodo de tiempo posterior al tenido en cuenta para realizar la calibración. No obstante se anota que la validación se enfocó en un nivel agregado (macro), más que un nivel micro a nivel de comportamiento del individuo.

Jensen et al., (2016) desarrollaron un modelo para evaluar el impacto en la eficiencia energética de la adopción de un equipo de calefacción con retroalimentación en una determinada ciudad de Alemania. En este modelo los agentes corresponden a hogares y toman dos decisiones: adoptar un equipo de calefacción con retroalimentación o adoptar un comportamiento específico de ahorro de energía, es de anotar que ambos procesos de adopción están conectados ya que el hacer uso de un equipo con retroalimentación puede generar cambios en los comportamiento de ahorro de energía que terminan convirtiéndose en un hábito.

Los agentes se generan a partir de datos de marketing sobre su estilo de vida, y los primeros usuarios de calefacción se seleccionan basados en una encuesta, de entre los cuales luego se seleccionan los que adoptan el comportamiento de ahorro de energía usando una tasa estimada a través de los datos históricos de búsquedas en Google sobre la materia. Dado que para esta población las encuestas indican que tanto la información como la influencia social afectan su proceso de adopción, en este modelo una vez seleccionados primeros los agentes que adoptan los comportamientos de ahorro de energía, el proceso adopción continúa ejecutándose para los demás agentes integrando la TPB en la toma de decisiones.

El proceso de adopción de los equipos con retroalimentación se realiza por su parte usando una probabilidad de adopción fija establecida a través de un estudio empírico. Para la calibración del modelo se usaron datos empíricos con el propósito de cuantificar el efecto de los dispositivos con retroalimentación, mediante la comparación con resultados arrojados por otros modelos. Con respecto a la validación, este trabajo no reporta ninguna validación rigurosa.

2.3.3. Modelo Consumat

El modelo *Consumat* es un marco psicológico social, en el que los agentes de consumo cambian entre varias estrategias cognitivas, comúnmente: comparación, repetición, imitación y deliberación, las cuales son determinadas por su necesidad de satisfacción y su grado de incertidumbre Jager et al., (2000) y Schwoon, (2006) utilizan un modelo basado en agentes para simular posibles rutas de difusión de vehículos de celdas de combustible (en adelante FCV), capturando dinámicas complejas entre consumidores, productores de automóviles, y propietarios de estaciones de servicio.

En el modelo, los productores ofrecen vehículos heterogéneos pero similares, decidiendo en cada período si cambian la producción a FCV. Los consumidores tienen diferentes preferencias por los atributos del automóvil, las necesidades de reabastecimiento de combustible y los factores de influencia social. Aunque en el enfoque *consumat* típico (Jager & Janssen, 2002), los consumidores siguen una de las cuatro estrategias cognitivas citadas según su nivel de necesidad de satisfacción e incertidumbre, las reglas usadas en este trabajo excluyen las estrategias repite e imita, argumentando que en la necesidad de satisfacción es significativamente baja para estos dos casos.

El agente consumidor maximiza la utilidad total esperada, la cual se expresa como una función del precio del automóvil, los impuestos, la cercanía entre las preferencias y las características del automóvil, la necesidad social en términos de la fracción de pares que adoptan cada tipo de producto y la disponibilidad de hidrógeno. En el modelo, las preferencias individuales pueden evolucionar con el tiempo para ser más congruentes con el "automóvil promedio", según lo determinado por un promedio ponderado de los atributos de los automóviles vendidos en el período anterior, donde los pesos corresponden a las cuotas de mercado. El modelo fue calibrado tratando de ajustarse a las características principales del mercado automotriz alemán, pero con respecto a su validación no se reporta intento de validación cuantitativa.

2.3.4. El modelo LARA

LARA es la abreviatura del *inglés* *Lightweight Architecture for boundedly Rational Agents*, una arquitectura simplificada de agentes para el diseño de simulaciones de políticas a gran escala (Briegel et al., 2012). En comparación con los marcos psicológicos existentes para agentes, LARA es más generalizable y más fácil de implementar. Respecto de estos tipos de modelos se revisaron dos estudios, ambos basados en datos empíricos.

Krebs y Ernst (2015) desarrollaron un modelo basado en agentes para simular en el espacio la adopción de la electricidad “verde” en Alemania. Cada agente representa un hogar que enfrenta la decisión de seleccionar entre proveedores “verdes” o “grises” de energía, cada agente está caracterizado una localización geográfica específica y un estilo de vida, y sus parámetros se inicializan usando datos empíricos de encuestas psicológicas experimentales y otros datos que están disponibles públicamente. Siguiendo LARA, se asume que los agentes toman decisiones en dos posibles modos, deliberativo y habitual (a partir de la experiencia anterior, tiende a actuar como ya lo ha hecho antes), siendo este último el comportamiento por defecto, pero desde el cual los agentes pueden cambiar al modo deliberativo motivados por un evento interno o externo como un cambio de precio, la comunicación personal, la necesidad de conocimiento o el contacto con los medios de comunicación.

Luego los agentes se deciden por un tipo de proveedor de energía usando como criterio la maximización de la utilidad empleando para esto suma ponderada de 4 objetivos: la orientación ecológica, la orientación económica, la conformidad social y la confiabilidad del suministro. Los pesos asignados a cada uno de los objetivos dependen del grupo de estilo de vida al que está asignado cada agente y se derivan de encuestas y una valoración de expertos (Ernst & Briegel, 2016). Una vez los agentes deciden el tipo de proveedor que seleccionarán gris o verde, escogen un distribuidor específico, sea uno que ya conocían o del que se enteraron a través de la voz a voz. Para este modelo la validación se enfocó en dos variables de estado del

comportamiento de los agentes: el tipo de proveedor y distribuidor seleccionado, lo que implica comparar los resultados arrojados por la simulación contra los datos históricos existentes. Sin embargo no se reporta una validación usando datos independientes.

2.4. Modelos heurísticos

Zhao et al., (2011) propusieron un marco de trabajo basado en agentes de dos capas para analizar la efectividad de políticas como el subsidio y la regulación en la adopción de la energía fotovoltaica (FV). El nivel bajo del modelo calcula el tiempo de retorno de la inversión basado en variables como la generación del sistema fotovoltaica, y el consumo de cada hogar, el precio de la unidad fotovoltaica y el precio de la energía. El nivel alto determina las decisiones de adopción de los individuos según sea determinado por sus atributos como: el periodo de recuperación de inversión, el ingreso del hogar, la influencia social y la publicidad.

Un aspecto esencial del modelo es el deseo de usar la energía FV, el cual se formula como una función lineal de los cuatro factores y desencadena la adopción de un agente cuando su valor supera un umbral específico. Los autores usaron los resultados de encuestas aplicadas en trabajos anteriores para producir la distribución de cada uno de los factores mencionados. La calibración del modelo se realizó ajustando los parámetros para ajustarse a las tasas de adopción anual de la energía FV a datos históricos, sin embargo no se reporta una validación cualitativa usando datos independientes.

2.5. Modelos basados en la estadística

2.5.1. Analysis Conjoint

Zhang et al., (2016) desarrollaron un modelo para estudiar la difusión de los vehículos de combustible alternativo (VCA), el modelo considera la interdependencia entre fabricantes, consumidores, agentes de gubernamentales y la industria automovilística. Los agentes del tipo fabricante seleccionan elementos como: tipo de motor, economía

de combustible, tipo de motor y precio, a través de un mecanismo que busca recurrentemente maximizar la utilidad en un entorno competitivo hasta alcanzar un determinado punto de equilibrio (Michalek, Papalambros, & Skerlos, 2005).

Los agentes del tipo consumidor deciden qué producto adquirir empleando una función de utilidad que corresponde a la suma ponderada de atributos, donde sus pesos se estiman mediante la técnica del *conjoint* basado en selección, a partir de datos empíricos obtenidos a través de una encuesta aplicada por García et al., (2007).

Los agentes del tipo gobierno seleccionan políticas enfocadas a influenciar el comportamiento, tanto de los fabricantes como de los consumidores. La calibración de modelo se realizó ajustando los parámetros a través del análisis *conjoint*, mientras que su validación se realizó siguiendo la validación de cuatro pasos descrita en Carley, (2011). Sin embargo el proceso de validación no utilizó datos independientes de los usados en la calibración.

Stummer et al., (2015) idearon un modelo basado en agentes para estudiar la difusión de diferentes productos, donde cada uno de ellos se caracteriza por un conjunto de atributos que son definidos mediante la discusión de un grupo focal de expertos. El verdadero rendimiento de cada atributo del producto es desconocido para los consumidores, y por lo tanto cada agente realiza un seguimiento de los valores de los atributos basados sobre la información recibida previamente, luego esta información se actualiza en función de las interacciones con sus pares, con la publicidad o a través de la experiencia directa.

El comportamiento de los consumidores (agentes) es gobernado por un conjunto de parámetros que capturan sus preferencias heterogéneas, donde el peso de cada uno de ellos se determina al aplicar el análisis *conjoint* sobre datos recopilados a través de una encuesta. Adicionalmente, el modelo también contempla los eventos publicitarios como uno de los mecanismos que impactan el conocimiento que los consumidores tienen de los productos o las preferencias que se tienen sobre ellos. Cada agente decide adoptar el producto que le provea la mayor utilidad, la cual es calculada como

una suma ponderada de los atributos asociados al producto usando los pesos que fueron determinados para cada uno, e integrando los cambios generados por los eventos publicitarios. El modelo fue validado extensivamente siguiendo a Knepell y Arangno (1993), incluyendo la validación conceptual, validación externa a nivel micro, validación externa a nivel macro y la validación de modelo cruzado. Sin embargo el punto débil de esta validación está en que solo se realizaron ejercicios sobre una muestra, pero sin usar datos independientes.

2.5.2. Modelos de selección discreta

Tran (2012), ideó un modelo basado en agentes para estudiar la difusión de la innovación energética, el comportamiento de los agentes está determinado por la importancia relativa que para ellos tienen los atributos de cada tecnológica y por la influencia social, la cual para este modelo ocurre de dos formas: la influencia indirecta que proviene de la población general, y la influencia directa que proviene de sus enlaces en la red social. El autor recurrió a los estudios de ABM en la literatura de mercadeo y formuló el modelo de adopción basado en una probabilidad, así:

$$Prob(t) = 1 - (1 - P_{ij})(1 - Q_{ij})^{K_{ij}} \quad (3)$$

Donde: P_{ij} captura la selección individual del agente usando el modelo de selección discreta en el cual la utilidad que el agente encuentra en la innovación está definido como el producto escalar de sus atributos con unos coeficientes aleatorios generados a través de diferentes distribuciones para capturar así la heterogeneidad en las preferencias de los agentes. Q_{ij} y K_{ij} corresponden a la influencia indirecta y directa respectivamente, las cuales se calculan en función del número de adoptantes en cada momento específico. Con respecto a la calibración y validación de este modelo, el estudio no reporta no reporta ejercicios cuantitativos de este tipo, ni el uso de datos empíricos para ello.

2.5.3. Modelos de aprendizaje de máquinas

Zhang et al., (2016) propusieron un marco de trabajo para el modelado basado en agentes y direccionado por datos, aplicado a la adopción de los paneles solares de techo para el aprovechamiento de la energía fotovoltaica (FV) en el condado de San Diego en California. En este marco, el primer paso es usar el aprendizaje de máquinas para calibrar el comportamiento individual del agente basado en datos que abarcan las características del hogar y las decisiones de compra respecto de la energía FV.

Luego, estos modelos de comportamiento individual son validados a través del método de la validación cruzada con el fin de asegurar su eficacia predictiva, para ello se usan datos que se usaron en la calibración, el proceso se repite hasta lograr una eficacia aceptable. Con el fin de asegurar la validación del modelo completo con datos independientes, la salida del modelo es comparada con los datos reales de adopción de la energía FV, adicionalmente otra porción de datos independientes se utiliza para validar la capacidad predictiva del modelo.

2.6. Modelos de influencia social

Karsai et al., (2014) desarrollaron un modelo basado en agentes para predecir la difusión de nuevas tecnologías al haber analizado el conjunto de datos de adopción de Skype. En este modelo los agentes se caracterizan por tener tres posibles estados: Susceptible (S), Adoptante (A), Removedor (R). El estado susceptible se refiere a un agente que puede adoptar el producto después, el estado adoptante se refiere a un agente que ya ha adoptado el producto y el estado removedor se refiere a un agente que en algún momento adopto el producto, pero que ya no hace uso de él y no volverá a considerar adoptarlo de nuevo.

La transición de S a A se regula por la adopción espontánea y la presión de los pares, la transición de A a S se regula por una terminación temporal y la transición de A a R se regula por una terminación permanente, cada una de estas transiciones se parametriza con una probabilidad constante que es igual para todos los agentes. Los demás parámetros del modelo se estiman a través de observaciones directas, o son determinados mediante el

método de ajuste no lineal de mínimos cuadrados aplicado a las tasas empíricas de adopción. Una vez el modelo ha sido ajustado a los datos de difusión observados en un periodo de cinco años, se realiza una validación a través de la predicción del modelo sobre la adopción en un periodo adicional de seis meses, esto se realiza a nivel macro respecto de la adopción agregada, pero no se realiza una validación a nivel micro.

En un trabajo posterior usando el mismo conjunto de datos de Skype Karsai et al., (2016) desarrollaron un modelo controlado por umbrales que incluye sólo los estados S y A, en el cual adicionalmente se supone que una porción de la población nunca adopta los productos. Este modelo es calibrado buscando que salida se ajuste a los datos reales de difusión de Skype, respecto de su validación, no se reporta un ejercicio de validación que utilice datos independientes.

Chica y Rand (2017), propusieron un marco de trabajo basado en agentes para la construcción de sistemas de apoyo a la toma de decisiones en programas de voz a voz, este marco se construyó con el fin de pronosticar la compra de aplicaciones bajo el modelo *freemium* (una parte de funcionalidades es gratuita y otra parte es paga) y poder evaluar políticas de mercado. El modelo captura la estacionalidad de las actividades del usuario mediante dos probabilidades, una asociada a los días ordinarios de la semana y otra asociada a los fines de semana, la red social inicial se configura imitando la red social real y luego para cada nodo se establece el peso de los vértices entrantes y el peso de los nodos salientes, convirtiendo la red en un grafo ponderado que representa la heterogeneidad de la influencia social entre los agentes.

El mecanismo de adopción en este trabajo toma de base la difusión de la información propuesta en el modelo de Bass basado en agentes (Rand & Rust, 2011). La calibración de parámetros reportada en este trabajo utiliza los algoritmos genéticos (Stonedahl & Rand, 2012), en donde el ajuste es determinado por la diferencia entre la difusión simulada y trayectoria de la adopción histórica observada, cabe resaltar que este modelo fue validado usando un conjunto de datos independientes al usado en su entrenamiento.

3. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Problema

En los últimos 60 años, desde los aportes iniciales como los de Everett M. Rogers en 1962, los investigadores han tratado de analizar la difusión de la innovación desde diferentes enfoques, pasando por la observación directa del fenómeno, el modelamiento matemático como el descrito en el modelo clásico de difusión de (Bass F. , 1969), el uso de analogías con modelos de la epidemiológica, la biológica y la ecológica (Mahajan & Muller, 1979), el ciclo de vida de las innovaciones (Moore, 1991), modelos matemáticos de difusión de la innovación (Meade & Islam, 2006; Peres, Muller, & Mahajan, 2010) entre otros. Estos años de investigación han llevado a identificar los principales factores que inciden en la difusión de una innovación, así como el proceso básico de toma de decisiones que siguen los adoptantes y el desarrollo de un amplio marco teórico en la materia, además de la construcción de una gran variedad de modelos de difusión que han permitido obtener herramientas de pronóstico y llegar a resultados cualitativos, entre otros.

La mayoría de modelos de difusión de la innovación existentes, como se explicó en la sección 1.1.1.4, aún poseen limitaciones derivadas de los supuestos que involucran desde su base teórica, como es el caso de sus dificultades para representar la heterogeneidad de los individuos que hacen parte de la red social donde se difunden las innovaciones y la dificultad para reproducir innovaciones que no se difunden exitosamente (Kiesling, 2011). No obstante, en los años recientes una técnica proveniente de las ciencias sociales ha ganado impulso gracias a la nueva disponibilidad generalizada del poder de cómputo, se trata de modelación basada en agentes -ABM- (cf. Squazzoni, 2010), la cual proviene de la teoría de los sistemas complejos adaptables -SCA- (Holland, 1995) y constituye una técnica fundamental en la “simulación social”, en donde ha sido usada como una herramienta de investigación de gran cantidad de temas como: la dinámica de la opinión pública y el desarrollo demográfico entre muchos otros. Esta técnica aparecida en los últimos años ofrece grandes oportunidades en el modelamiento de la difusión de la

innovación, ya que promete superar muchas limitaciones de los modelos tradicionales dada su facilidad para representar la heterogeneidad de individuos y de enlaces sociales entre ellos (Kiesling, 2011), lo cual podría materializarse en la construcción de modelos de difusión de la innovación a la medida, la exploración detallada del impacto de la heterogeneidad en el proceso de difusión de la innovación, y el aprovechamiento del creciente poder de cómputo en la realización de simulaciones de procesos de difusión.

La pertinencia del análisis de los procesos de difusión de la innovación a través de la modelación basada en agentes radica en que tal fenómeno, presenta heterogeneidad de sus individuos como un factor clave, es en sí mismo un SCA, como se deriva del hecho de que en él se identifican las características definidas por Holland (1995) para este tipo de sistemas, y que ya han sido descritas en el numeral 2.1.

En razón a lo anterior, toma relevancia que se exploren y analicen las posibilidades reales que ofrecen los modelos basados en agentes para la modelación de los procesos de difusión. Para el caso específico de esta propuesta, la labor de exploración se plantea con el análisis de la dinámica del proceso de difusión de la herramienta de teletrabajo denominada SAROFI en una unidad académica de la Universidad de Antioquia. Cabe anotar que dicha herramienta ya no se encuentra en operación, dado que fue reemplazada por las herramientas de computación en la nube, por lo que fue precisamente el hecho de contar con datos detallados de su difusión, desde el lanzamiento hasta su desmonte, lo que la hace pertinente el análisis sobre los datos arrojados existentes.

El estudio del proceso de difusión de SAROFI presentó varios desafíos, siendo el más importante la heterogeneidad de los individuos que hacen parte del sistema social en que se introdujo la herramienta, pues en él existen cuatro categorías excluyentes de individuos, actores y/o agentes:

Directivos: es el personal que ocupa cargos de dirección dentro de la unidad académica, decano, vicedecano, directores área y directores de programa entre otros.

Asociados: es el personal docente de carrera que se encuentran en alguna de las categorías del escalafón profesoral, poseen un vínculo formal y permanente con la unidad

académica, también se conocen como docentes de planta.

Ocasionales: es el personal docente que es requerido transitoriamente por la unidad académica para un período inferior a un año, también poseen un vínculo formal como profesor, pero éste es temporal.

NoDocentes: es el personal que desarrolla labores administrativas en la unidad académica, y que no tiene como principal propósito el ejercicio de la docencia universitaria.

Los individuos de cada una de estas categorías poseen perfiles diferentes, situación que si bien es una consecuencia natural de las disparidades de intereses, tareas y objetivos de cada uno, pudo ser constatada directamente por el autor de esta propuesta, ya que hizo parte durante siete años de la unidad académica objeto de análisis y además estuvo al frente del proceso de difusión de SAROFI. En consecuencia de lo anterior, no resulta razonable analizar el citado proceso de difusión bajo el supuesto de que todos los individuos llevan a cabo el mismo proceso de toma de decisiones con respecto a la adopción, ni tampoco suponer que su sensibilidad a la influencia externa o interna es homogénea, como ocurriría al usar un modelo tradicional de difusión de la innovación.

En este orden de ideas, y habiendo ya en la sección 1 analizado los diferentes modelos de difusión de la innovación existentes, cobra relevancia el realizar un análisis de la dinámica proceso de difusión de SAROFI a través de un modelo de difusión basado en agentes, una técnica que permite no solo modelar la con libertad la heterogeneidad de individuos propia del caso de análisis, sino también observar los posibles patrones que eventualmente podrían emerger en diferentes escenarios de simulación.

3.2. Hipótesis

Durante la difusión de la tecnología de teletrabajo denominada SAROFI en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia emergieron patrones de adopción asociados a la heterogeneidad de la población de potenciales adoptantes.

3.3. Justificación

El desarrollo de este trabajo cobra relevancia al ofrecer la oportunidad de explorar el fenómeno de la difusión de la innovación a través de una herramienta recientemente disponible como la ABM. Cabe anotar que la difusión de la innovación es un fenómeno que es objeto de estudio actualmente en los ámbitos académicos y también en la industria, en especial por su relación con el mercadeo de nuevos productos y servicios. El abordaje que se plantea a través de la ABM como herramienta para representar la heterogeneidad de potenciales adoptantes, abre la posibilidad de explorar de forma particular su comportamiento y el impacto de éste sobre la difusión de la innovación.

En este orden de ideas, y habiendo ya analizado en la sección 1.1 los diferentes modelos de difusión de la innovación existentes y sus limitaciones, cobra relevancia el realizar un análisis de la dinámica proceso de difusión de SAROFI a través de un modelo de difusión basado en agentes, una técnica que permitirá no solo modelar la con libertad la heterogeneidad de individuos propia del caso de análisis, sino también permitirá como resultado final identificar y analizar los posibles patrones que eventualmente emerjan en diferentes escenarios de simulación, observando de esta forma características del fenómeno que no pueden ser fácilmente apreciables cuando se usan otras técnicas.

De este modo podría lograrse una mejor comprensión de la dinámica proceso de difusión de SAROFI, incluyendo factores, variables o interacciones de los anteriores que puedan explicar el desarrollo de fenómeno y que eventualmente sugieran ideas que puedan extrapolarse a procesos de difusión con condiciones similares.

3.4. Objetivos

3.4.1. Objetivo General

Analizar los patrones de adopción de la tecnología de teletrabajo denominada SAROFI en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, a través de un Modelo Basado en Agentes.

3.4.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión de la literatura sobre la modelación basada en agentes aplicada a la simulación de la difusión de la innovación para establecer un marco conceptual y estado del arte pertinentes a la investigación.
- Construir un modelo de simulación basado en la interacción de agentes del proceso de difusión de SAROFI para analizar el comportamiento del fenómeno en diferentes condiciones.
- Analizar patrones de adopción a partir de las configuraciones del modelo en distintos escenarios para mejorar la comprensión de la dinámica proceso de difusión de SAROFI.

3.5. Enfoque de la investigación

En primer lugar debe aclararse que el proceso de difusión de la herramienta de teletrabajo denominada SAROFI, es un proceso ya finalizado y que no se pretende con este trabajo definir estrategias para aplicarse en lo inmediato, y modificar así la realidad de la adopción de la herramienta y sus posibles consecuencias como la mejora de la unidad académica, sino que pretende arrojar luz sobre los posibles patrones de adopción que hubieran existido y los factores que más podrían influir sobre ellos, explorando de paso la utilidad de los modelos basados en agentes en el estudio de la difusión de la innovación.

En razón a lo anterior este trabajo se perfila como una investigación, en primera instancia de tipo descriptiva, pues se pretende utilizar la ABM a modo de herramienta para describir cómo se desarrolló el proceso de difusión de SAROFI y los patrones que pudieron haber emergido durante el mismo. No obstante los resultados obtenidos podrían, en parte, tocar el campo de la investigación del tipo explicativo, esto en la medida en que podría llegar tratar inferencias sobre el “por qué” de características específicas del

proceso de difusión de la innovación analizado, sin que esto sea el objetivo principal del trabajo aquí expuesto.

4. Metodología y resultados

Según lo propuesto y el estado del arte establecido, se procede en este capítulo en primer lugar a describir el enfoque metodológico usado, y en segundo lugar a presentar su desarrollo mediante la construcción y validación de un modelo para el análisis de la difusión de la innovación de la herramienta SAROFI, en una unidad académica de la Universidad de Antioquia, además de su uso en experimentos de simulación para identificar y analizar los patrones de adopción emergidos.

4.1. Enfoque metodológico

En el desarrollo de este trabajo se adoptó el proceso para la creación, validación y verificación de modelos que ha sido propuesto por Robert G. Sargent (2011; 2013) y adaptado en (Uribe-Gómez & Quintero, 2017; Quintero Ramírez & Giraldo Ramírez, 2018). En la Figura 4 se muestra un esquema general del proceso base de la metodología utilizada, incluyendo sus principales elementos y relaciones, donde cada uno de ellos se describe como sigue:

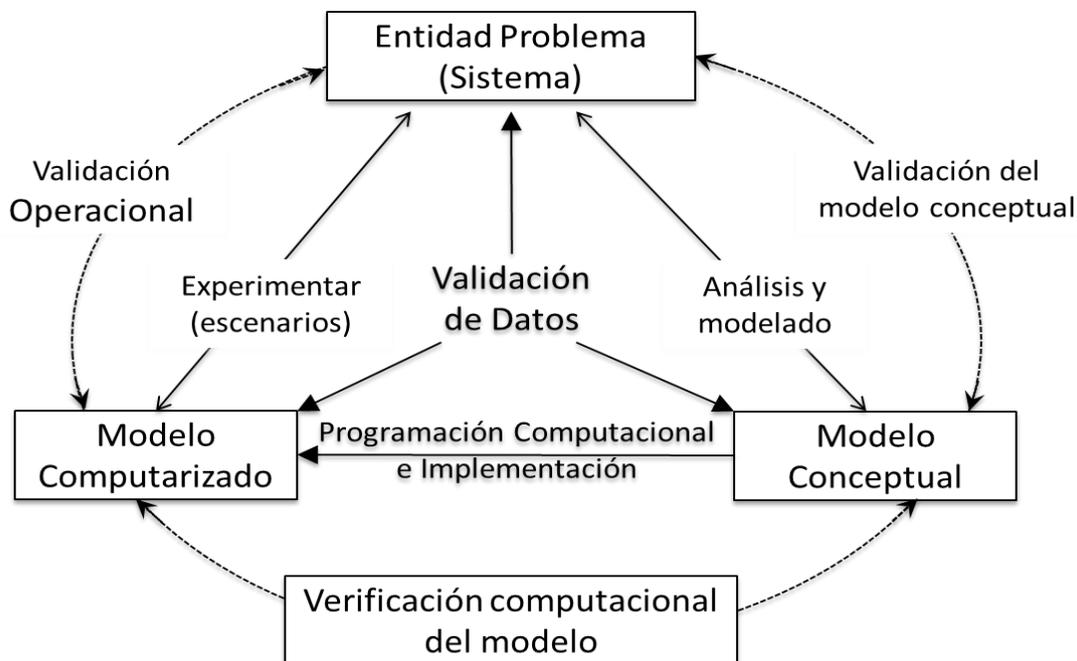


Figura 4. Proceso adoptado para la creación, validación y verificación de modelos

Fuente: Adopción a partir de (Quintero Ramírez & Giraldo Ramírez, 2018)

Una entidad problema: es el sistema, idea, situación o política que será modelada, en el caso de este trabajo: la dinámica del proceso de difusión de la herramienta -SAROFI- en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

Un modelo conceptual: Es la representación lógico matemática de la entidad problema desarrollada para un estudio en particular.

Una validación del modelo conceptual: Es la tarea mediante la cual se determina que las teorías y suposiciones que subyacen en el modelo conceptual son correctas y que la representación que hace el modelo de la entidad problema es razonable para el propósito previsto en el modelo.

Un modelo computarizado: Es la implementación del modelo conceptual desarrollado mediante un lenguaje de programación computacional.

Una verificación del modelo computarizado: Es la tarea mediante la cual se asegura que la programación e implementación del modelo conceptual se realizó correctamente y en consecuencia el modelo computarizado se comporta de la misma forma que el modelo conceptual.

Una validación operacional: Es la tarea mediante la cual se determina si los comportamientos de las salidas del modelo computarizado tienen la suficiente precisión respecto al propósito previsto.

Una validación de datos: Es la tarea mediante la cual se asegura que los datos necesarios para la construcción, evaluación y prueba del modelo, la conducción de experimentos y solución del modelo son adecuados y correctos.

4.2. Construcción del modelo

4.2.1. Construcción del modelo conceptual

Como primer paso para la construcción del modelo conceptual se identifican las teorías que existen sobre el fenómeno estudiado, en este caso la difusión de la innovación, las cuales se abordaron en el capítulo 1 Marco teórico. Adicionalmente se tomó como base el estudio de los datos recolectados durante el proceso de difusión de SAROFI y el conocimiento que el autor tuvo del mismo, al estar durante más de 7 años al frente del diseño, desarrollo, implementación, y despliegue de la herramienta. A partir de estos dos elementos se definen los componentes básicos que constituirán el modelo como: los agentes, sus características, reglas de toma de decisiones y las reglas de interacción entre agentes además de otros.

4.2.1.1. Los agentes

Los agentes identificados en el modelo conceptual corresponden a los individuos que hacen parte de la población de la unidad académica específica en la cual se analiza el proceso de difusión, a estos individuos se les caracterizó y diferenció dentro de la población así:

Directivos: Es el personal que ocupa cargos de dirección dentro de la unidad académica, decano, vicedecano, directores área y directores de programa entre otros.

Asociados: Es el personal docentes de carrera que se encuentran en alguna de las categorías del escalafón profesoral, poseen un vínculo formal y permanente con la unidad académica, también se conocen como docentes de planta.

Ocasionales: Es el personal docente que es requerido transitoriamente por la unidad académica para un período inferior a un año, también poseen un vínculo formal como profesor, pero este es temporal.

NoDocentes: Es el personal que desarrolla labores administrativas en la unidad académica, y que no tiene como principal propósito el ejercicio de la docencia universitaria.

Adicionalmente, se incluyó en el modelo un agente adicional llamado **Entorno** el cual es utilizado para representar los cambios en el entorno que afectan el proceso de adopción de la herramienta de teletrabajo SAROFI, y especialmente las condiciones que amenazan el acceso de los profesores y empleados no docentes a sus oficinas, como lo son los cierres no programados debido a problemas de orden público. Este agente genera cambios en los parámetros de influencia externa (*p* descrito más adelante) para los demás agentes y además modifica los parámetros a través de los cuales evalúan la innovación para decidir si la adoptan o no, de esta manera se representa un fenómeno observado en el proceso de difusión real, pues cuando se incrementaba el riesgo de que el personal no tuviera acceso a sus oficinas, se aumentaba también la tasa de adopción de SAROFI.

Con respecto a los principales atributos de cada uno de los citados agentes, se tienen que los “**Directivos**”, “**Asociados**” y “**Ocasionales**” poseen: una edad, un parámetro de influencia interna q , y también un porcentaje de su trabajo que realizan apoyado en las TIC, los dos últimos asignados a través de una función de probabilidad normal inversa a partir de una media y una desviación estándar que son configurables. Adicionalmente, estos agentes poseen un umbral de complejidad de la innovación, un valor configurable que se utiliza para evaluar esta propiedad de la innovación y determinar en qué medida es aceptable para cada individuo. De otro lado, para los agentes de tipo “**No_docentes**” sólo se tiene un parámetro de influencia interna q que se asigna a través de una

función de probabilidad normal inversa cuyos parámetros son configurables. Además de los anteriores atributos, el proceso de adopción que realiza cada uno de los distintos tipos de agente se modeló a través de un mecanismo basado en la conceptualización realizada por Rogers (2003), en el cual los individuos pasan secuencialmente por los siguientes estados:

Estado de desconocimiento: En el que el individuo no tiene conocimiento de la existencia de la innovación

Estado de conocimiento: En el cual el individuo ha estado expuesto a la innovación y toma conciencia de su existencia, pero no busca activamente información sobre ella.

Estado de persuasión: En el cual el individuo busca activamente información sobre la innovación, y realiza una evaluación la misma a fin de determinar si está dispuesto o no adoptarla. El mecanismo de evaluación específico se describe en la sección 4.2.1.2.

Estado de decisión: En el cual el individuo adopta la innovación, que en caso específico de estudio corresponden a inscribirse y solicitar una cuenta de usuario en la herramienta de teletrabajo SAROFI.

Es de anotar que el mecanismo descrito por Rogers (2003) incluye también un estado de implementación, en el cual el individuo hace uso de la innovación, pero el análisis del uso y aprovechamiento de la herramienta de teletrabajo SAROFI no se incluyó en el alcance de este trabajo, razón por la cual, este estado no se incluyó en el modelo construido.

Con respecto a las relaciones entre los agentes contenidos en el modelo, todos los agentes que tienen el misma clasificación se encuentran conectados entre sí, esta

estructura de red social corresponde al reducido número de individuos que hacen parte de la población, lo cual permite que todas las personas del mismo tipo de vinculación a la unidad académica se conozcan entre sí, situación que pudo ser observada por el autor durante los años que hizo parte de la misma unidad.

4.2.1.2. Las reglas de los agentes

El principal objetivo de las reglas definidas para los agentes es orientar sus decisiones sobre cuando cambiar entre los diferentes estados del proceso de adopción modelado. Los individuos en la clasificación Directivos, Asociados y Ocasionales poseen reglas que les permiten pasar entre los 4 estados de adopción definidos, indicando de esta forma que poseen un mecanismo de adopción complejo, mientras que los individuos con la clasificación NoDocentes, sólo pasan por 3 de los estados de adopción descritos, indicando con esto que poseen un mecanismo de adopción más simple.

Las reglas que rigen los cambios de estado de los individuos son fundamentalmente de dos tipos:

Reglas de cambio activo: Son reglas que disparan eventos derivados del proceso mismo de difusión, como pasar al estado de conocimiento de la innovación a causa de ser cubierto por los esfuerzos promocionales como las reuniones informativas, o como pasar al estado de decisión adoptando la innovación a causa de que la evaluación de algunos factores de la misma resulta satisfactoria para un individuo.

Reglas de cambio pasivo: Son reglas fundamentadas en el cálculo de la probabilidad de cambio de estado determinada por un cálculo basado en el modelo de Bass (1969), en este cálculo intervienen tanto un parámetro de influencia externa como un parámetro de influencia interna, además de la proporción de agentes con la misma clasificación que ya han realizado el cambio de estado. La fórmula utilizada para calcular la probabilidad de cambio de estado de un individuo se muestra en la Ecuación 3:

$$p + qF(t) \quad (3)$$

Donde

p representa el parámetro de influencia externa para el cambio de estado específico

q representa el parámetro de influencia interna para el cambio de estado específico

$F(t)$ representa la proporción de agentes con la misma clasificación que se encuentran en el estado de destino en el tiempo t

Cabe anotar que el valor del parámetro p es diferente para individuos con diferente clasificación y además puede cambiar en el tiempo a causa de los cambios inducidos por el agente entorno. El parámetro q es un atributo de cada agente y por ende es diferente para cada uno de ellos, manteniéndose dentro de un rango de valores configurable en el modelo.

Las reglas de cambio pasivo se aplican por los individuos en cada momento t , pero lo hacen después de haber aplicado las reglas de cambio activo.

A continuación se presenta una descripción de las reglas definidas para cada cambio estado según el tipo de individuo.

Para los individuos clasificados como Directivos, Asociados, Ocasionales y NoDocentes:

Paso del estado de Desconocimiento al estado de Conocimiento:

- **Regla de cambio activo:** El cambio de estado ocurre cuando el individuo es cubierto por los esfuerzos de promoción de la innovación, como las reuniones informativas y los correos electrónicos promocionales. Se aplica multiplicando el número de individuos por categoría que se encuentra en el estado de desconocimiento por el porcentaje de efectividad de los esfuerzos promocionales (parámetro nombrado en el modelo como “*Probabilidad de conocer SAROFI en el momento de su lanzamiento*”)

Regla de cambio pasivo: El cambio de estado ocurre cuando se genera para el individuo un número aleatorio que alcanza el umbral de probabilidad de cambio de estado determinado por el valor arrojado mediante el cálculo de probabilidad asociado $p + qF(t)$.

Para los individuos clasificados como Directivos, Asociados, Ocasionales:

Paso del estado de Conocimiento al estado de Persuasión

- **Regla de cambio activo:** El cambio de estado ocurre para todos los individuos que se encuentren en estado de conocimiento, en este estado evalúan la complejidad y ventajas relativas de la innovación, aplicando la ecuación 4:

$$\text{Calificación} = f_{\text{edad}}(\text{edad}) * pe + \text{porcentaje_trabajo_TIC} * pt \quad (4)$$

Donde:

$f_{\text{edad}}()$: Es una función que toma la edad del individuo y arroja un valor entre 0 y 1 que estima la calificación que la persona le asigna a la innovación según su edad, a menor edad se asigna una mayor calificación. Esta función fue ajustada a partir de lo postulado en (Patrickson, 2002; Haddon & Brynin, 2005), además de la observación directa que el autor pudo realizar de la relación existente entre la edad de los individuos y su favorabilidad hacia el teletrabajo.

$\text{porcentaje_trabajo_TIC}$: Es el porcentaje de trabajo que cada individuo realiza apoyado en las TIC, corresponden a un atributo de los agentes que fue descrito en la sesión 4.1.1.1

pe y pt : Son los pesos de la edad y el porcentaje de trabajo apoyado en TIC respectivamente.

Paso del estado de Persuasión al estado de Decisión

- **Regla de cambio activo:** El cambio de estado ocurre cuando el valor arrojado por la calificación calculada mediante la regla de cambio activo del estado de Conocimiento al estado de Persuasión superó el umbral establecido particularmente para cada agente.

Regla de cambio pasivo: El cambio de estado ocurre cuando se genera para el individuo un número aleatorio que alcanza el umbral de probabilidad de cambio de estado determinado por el valor arrojado mediante el cálculo de probabilidad asociado $p + qF(t)$.

Para los individuos clasificados como NoDocentes

Paso del estado de Conocimiento al estado de Decisión

- **Regla de cambio pasivo:** El cambio de estado ocurre cuando se genera para el individuo un número aleatorio que alcanza el umbral de probabilidad de cambio de estado determinado por el valor arrojado mediante el cálculo de probabilidad asociado $p + qF(t)$.

4.2.1.3. Los parámetros del modelo

A fin de hacer el modelo altamente configurable y por ende versátil y adoptable a los diferentes escenarios de simulación en que podría ser usado, se incluyeron en él 3 grupos de parámetros:

- Grupo número de agentes por categoría
- Grupo parámetros generales a todos los agentes el mismo tipo
- Grupo de parámetros individuales por tipo de agente

Los dos últimos grupos se relacionan con los atributos descritos para cada uno de los distintos tipos de agentes en la sección 4.2.1.1. A continuación se presentan los parámetros incluidos en cada grupo:

Grupo número de agentes por categoría

Este grupo incluye los parámetros que determinan el número de agentes que operará el modelo, sus valores deben ser asignados en el momento de la configuración inicial

- **nro_directivos:** Indica el número total de agentes del tipo Directivo que serán incluidos.
- **nro_asociados:** Indica el número total de agentes del tipo Asociado que serán incluidos.
- **nro_ocasionales:** Indica el número total de agentes del tipo Ocasionales que serán incluidos.
- **nro_nodocentes:** Indica el número total de agentes del tipo NoDocentes que serán incluidos.

Grupo parámetros generales a todos los agentes del mismo tipo

Este grupo incluye parámetros cuyo valor es el mismo para todos los agentes de un mismo tipo, aunque puedan existir valores diferenciados entre las distintas categorías, esta significa que sólo se requiere un parámetro por tipo de agente.

- **Probabilidad de conocer SAROFI en el momento de su lanzamiento:** Indica el porcentaje de agentes de cada tipo que pasan del estado de Desconocimiento al estado de Conocimiento en el momento del lanzamiento de la herramienta SAROFI, está asociado a la efectividad de los esfuerzos iniciales de promoción.
- **Parámetros de influencia externa en la etapa de conocimiento:** Indica la influencia externa a la que están sometidos todos los agentes de un mismo tipo mientras permanezcan en estado de conocimiento, está asociada al parámetro p de modelo de difusión de Bass.
- **Parámetros de influencia externa en la etapa de decisión:** Indica la influencia externa a la que están sometidos todos los agentes de un mismo tipo mientras permanezcan en estado de conocimiento, está asociada al parámetro p de modelo de difusión de Bass.

Grupo de parámetros individuales por tipo de agente

Este grupo incluye parámetros que determinan el valor particular de los atributos individuales de cada uno de los agentes en las diferentes categorías, cabe anotar que para cada agente se realizan cálculos basados en los parámetros de este grupo que permiten definir el valor de sus atributos particulares.

Parámetros para los agentes en las categorías Directivos, Asociados, Ocasionales y NoDocentes

- **Media del parámetro de influencia interna q :** Determina la media del parámetro de influencia interna q para todos los agentes dentro de la misma categoría, se usa como dato de entrada para una función normal inversa cuyo resultado permite asignar el valor del atributo “parámetro de influencia interna q ” a cada agente.
- **Desviación estándar del parámetro de influencia interna q :** Determina la desviación estándar del parámetro de influencia interna q para todos los agentes dentro de la misma categoría, se usa como dato de entrada para una función normal inversa cuyo resultado permite asignar el valor del atributo “parámetro de influencia interna q ” a cada agente.

Parámetros para los agentes en las categorías Directivos, Asociados y Ocasionales, no incluye a la categoría NoDocentes.

- **Media del porcentaje de trabajo realizado apoyado en TIC:** Determina la media del porcentaje de trabajo que se realiza apoyado en TIC para todos los agentes dentro de la misma categoría, se usa como dato de entrada para una función normal inversa cuyo resultado permite asignar el valor del atributo “Media del % de trabajo TIC” a cada agente.
- **Desviación estándar del porcentaje de trabajo realizado apoyado en TIC:** Determina la desviación estándar del porcentaje de trabajo que se realiza apoyado en TIC para todos los agentes dentro de la misma categoría, se usa como dato de entrada para una función normal inversa cuyo resultado permite asignar el valor del atributo “Media del % de trabajo TIC” a cada agente.

- **Umbral complejidad de la innovación:** Determina el umbral con el que será comparado el valor arrojado por la calificación de la innovación que cada agente realice. Este valor se usa al aplicar la regla de cambio activo del estado de Conocimiento al estado de Persuasión y fue descrita en la sección 4.2.1.2.

4.2.2. Validación del modelo conceptual

Como ya se indicó en la sección 4.1, la validación conceptual del modelo tiene como propósito determinar que las teorías y suposiciones que subyacen en el modelo conceptual son correctas y que la representación que hace el modelo de la entidad problema es razonable para el propósito previsto en el modelo. Un enfoque metodológico consistente con este propósito es el método histórico del racionalismo, el cual busca comprobar que los supuestos subyacentes de un modelo son ciertos; esto se hace a partir de premisas que se desprenden de deducciones lógicas, basadas en la teoría para desarrollar el modelo válido (Quintero Ramírez & Giraldo Ramírez, 2018)

En razón a lo anterior a continuación se presentan cada una de los supuestos involucrados en el modelo, acompañadas de su correspondiente base teórica.

Supuesto: El porcentaje de trabajo que realiza apoyado en TIC inciden sobre la difusión de la tecnología de teletrabajo SAROFI

Soporte: El supuesto se encuentra soportado en la teoría de la difusión de la innovación propuesta por (Rogers, 2003), donde se establece que la velocidad y el grado con el que una innovación se difunde está relacionada con diferentes factores, y sostiene que la mayor parte de la variación en la tasa de adopción, entre el 49% y el 87%, se explica mediante cinco atributos de la innovación: ventajas relativas, compatibilidad, posibilidad de observación, complejidad y posibilidad de ensayo. Por lo que la afinidad de un individuo con las TIC, inevitablemente afecta la valoración que hace de estos atributos con respecto a SAROFI.

Supuesto: La edad de un individuo incide sobre su favorabilidad hacia la herramienta de teletrabajo SAROFI

Soporte: El supuesto se encuentra soportado tanto en la citada teoría de la difusión de la innovación propuesta por (Rogers, 2003) en lo referente a la valoración que el individuo haga de los atributos de compatibilidad y complejidad de una innovación, así como en lo postulado en (Patrickson, 2002; Haddon & Brynin, 2005) que sostiene que la edad puede constituir una barrera para acceder al teletrabajo.

Supuesto: Un individuo puede pasar por varios estados en su proceso de adopción de una innovación

Soporte: El supuesto se encuentra soportado por la conceptualización realizada por (Rogers, 2003) sobre el mecanismo de adopción de los consumidores como un proceso, el cual tiene como finalidad determinar si adoptan o rechazan una innovación.

Supuesto: La decisión de adopción de un individuo puede abordarse en función tanto de la influencia interna como externa que actúa sobre él

Soporte: El supuesto se encuentra soportado en el modelo clásico de difusión de la innovación establecido en (Bass F. , 1969)

Supuesto: Los individuos en la categoría NoDocentes ejecutan un proceso de adopción de la innovación SAROFI más simple que el de los individuos de las demás categorías.

Soporte: El supuesto se encuentra soportado también en el trabajo de Rogers (2003), donde se aclara que su conceptualización, más allá de asumir que los individuos evalúan y ejecutan objetiva y racionalmente sus decisiones de innovación en cada estado y momento específico, resalta la importancia de la formación dinámica de

actitudes y percepciones subjetivas que son transmitidas mediante la comunicación entre los miembros del sistema social.

4.2.3. Construcción del modelo computacional

Como ya se indicó en la sección 4.1, la construcción del modelo computacional consiste en la transformación del modelo conceptual para que pueda ser ejecutado por un equipo de cómputo, lo cual se logra mediante su transcripción a un lenguaje de programación computacional. En este sentido se llevó a cabo una abstracción simple del modelo conceptual a través de un diagrama de flujo como paso previo a su implementación en el lenguaje Netlogo 6.0.4, es de anotar que por esta razón el diagrama incluye algunas instrucciones propias de dicho lenguaje como “ask” que ordena la ejecución de un procedimiento. En la Figura 5 se presenta el diagrama de flujo construido.

Como es natural a la mayoría de implementaciones en el lenguaje Netlogo, las instrucciones que darán vida al modelo computacional se encuentran divididas en dos grandes fases: Setup y Go; en la primera se realizan todas las acciones orientadas a establecer las condiciones iniciales de operación del modelo, mientras que en la segunda se realizan las acciones propias de su funcionamiento rutinario. A continuación se describe el propósito de los procedimientos de cada una de estas dos fases, es de anotar en el diagrama de flujo presentado en la Figura 5 los procedimientos se muestran en los recuadros de color cian.

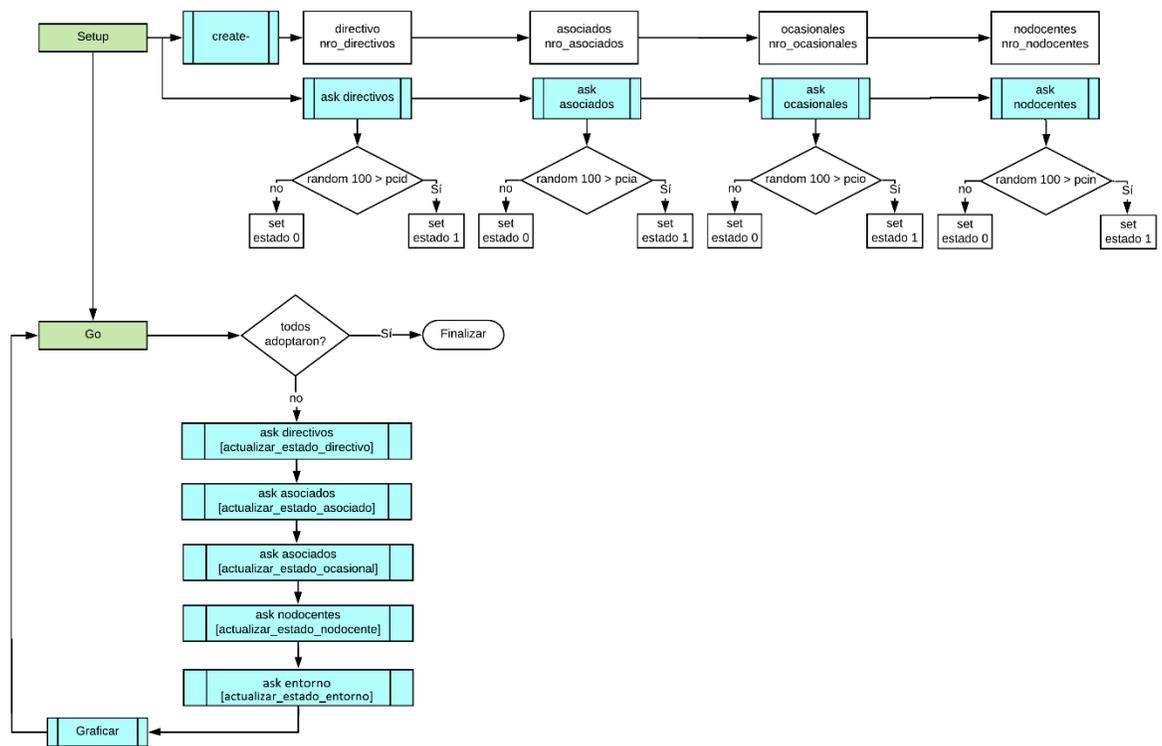


Figura 5: Diagrama de flujo base del modelo computarizado

Fuente: elaboración propia

Fase Setup

En esta fase además de realizarse la creación de los agentes según la cantidad definida por los parámetros del grupo “número de agentes por categoría”, descrito en la sección 4.3.1.2, se establece su estado inicial a partir de los parámetros “Probabilidad de conocer SAROFI en el momento de su lanzamiento” descritos en la misma sección. Las variables asociadas a estos últimos parámetros para el caso de cada categoría de agente son:

PCID: Probabilidad de que un agente de la categoría Directivos conozca SAROFI en el momento de su lanzamiento.

PCIA: Probabilidad de que un agente de la categoría Asociados conozca SAROFI en el momento de su lanzamiento.

PCIO: Probabilidad de que un agente de la categoría Ocasionales conozca SAROFI en el momento de su lanzamiento.

PCIN: Probabilidad de que un agente de la categoría NoDocentes conozca SAROFI en el momento de su lanzamiento.

El valor de estas variables se compara con un número aleatorio entre 0 y 1 que es generado para cada agente, lo que determina si al momento del lanzamiento de la herramienta SAROFI el agente tendrá o no conocimiento de su existencia. Se asigna el valor 0 para el estado Desconocimiento y valor 1 para el estado Conocimiento.

Fase Go

Los procedimientos de esta fase se cargan de aplicar de forma recurrente las reglas de cambio de estado para que fueron descritas en la sección 4.2.1.2 mediante la ejecución de los procedimientos: actualizar_estado_directivo, actualizar_estado_asociado, actualizar_estado_ocasional y actualizar_estado_nodocente. Adicionalmente, esta fase incluye procedimientos para actualizar el estado del agente entorno (actualizar_estado_entorno) y para presentar las gráficas de las curvas de adopción acumulada para cada de las distintas categorías de agentes.

Después de haber completado el diagrama de flujo y los procedimientos que incluía, este se convirtió un modelo computarizado mediante su implementación a través del lenguaje de programación Netlogo 6.0.4. Las diferentes clasificaciones de los agentes se definieron como razas de tortugas, ubicadas en distintas posiciones del eje x en el mundo de Netlogo, mientras que los diferentes estados del proceso de adopción se representaron como diferentes niveles de altura en el eje y. Adicionalmente el comportamiento del agente entorno se representó en el mundo Netlogo mediante una figura de casa ubicada en la parte inferior izquierda, la cual cambia de color entre verde, y amarillo según la probabilidad afectaciones del estado operativo del campus universitario. Para facilitar la visualización del comportamiento de los diferentes tipos de individuos se les asignó un color que los identifica, así:

Directivos : Color amarillo

Asociados : Color azul

Ocasionales: Color naranja

No Docentes: Color verde

Adicionalmente se agregaron tres juegos de controles asociados a los tres grupos de parámetros descritos en la sección 4.2.1.2, los cuales permiten a quien ejecute las simulaciones ajustar fácilmente los parámetros del modelo

En la Figura 6 se presenta una captura pantalla del modelo computacional implementado, además el código fuente con el detalle de las instrucciones de los procedimientos implementados se puede consultar en el Anexo A.

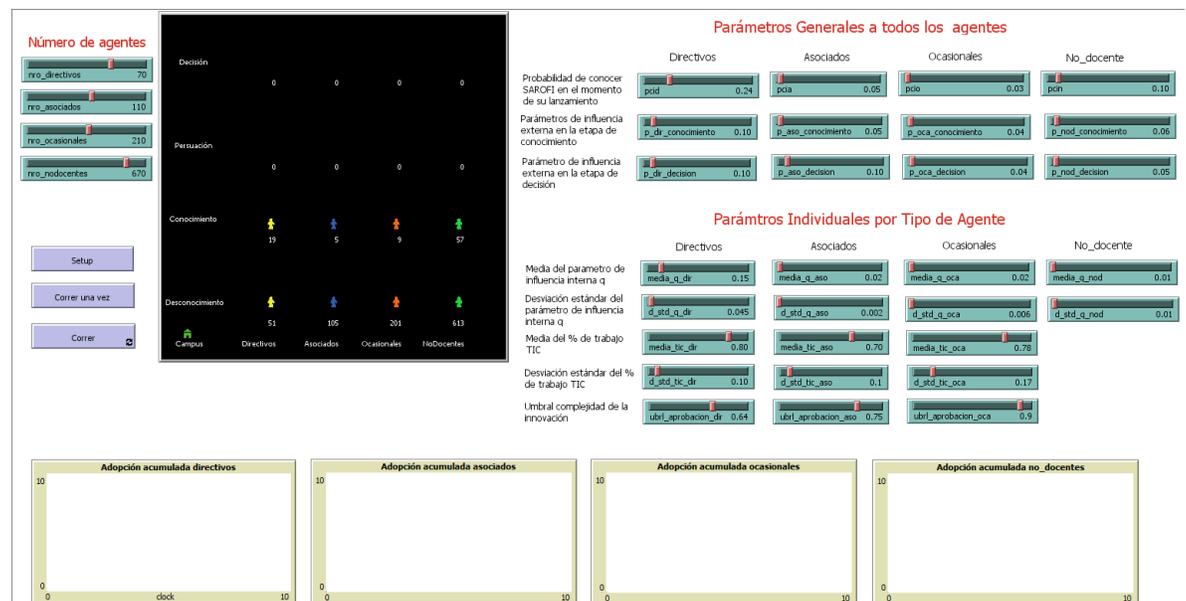


Figura 6. Captura de pantalla del modelo implementado en Netlogo

Fuente: interface del programa Netlogo 6.0.4

4.2.4. Verificación del modelo computacional

Como ya se indicó en la sección 4.1 la verificación del modelo computacional es la tarea mediante la cual se asegura que la programación e implementación del modelo conceptual se realizó correctamente y en consecuencia el modelo computarizado se comporta de la misma forma que el modelo conceptual. Para realizar esta verificación se usó la técnica de validación de trazas que consiste en un seguimiento de los comportamientos de las entidades a través de cada procedimiento y en modelo general, con el fin de determinar si los supuestos y reglas definidas sí se están cumpliendo (Quintero Ramírez & Giraldo Ramírez, 2018). A continuación se presenta el seguimiento realizado para cada procedimiento definido en el modelo.

Fase Setup

Creación de agentes en la categoría Directivos (*create-directivos*)

Este procedimiento consiste en la iniciación, aparición y asignación de estado inicial (Conocimiento o Desconocimiento) para los agentes de tipo Directivo, se realizan pruebas para garantizar el adecuado posicionamiento de los agentes y para garantizar que su distribución en los dos posibles estados iniciales corresponde con la proporción definida por la variable PCID. Cuando se ordena la ejecución de los procedimientos de la fase Setup, puede verificarse que los agentes de la categoría Directivos se posicionan sobre una misma ubicación horizontal (eje x) y se distribuyen en los estados iniciales, tal y como se parecía en la Figura 7, donde también se puede observar que la proporción de agentes en el estado de Conocimiento ($19/70 = 0.27$) es consistente con el valor de la variable $PCID = 0.24$.

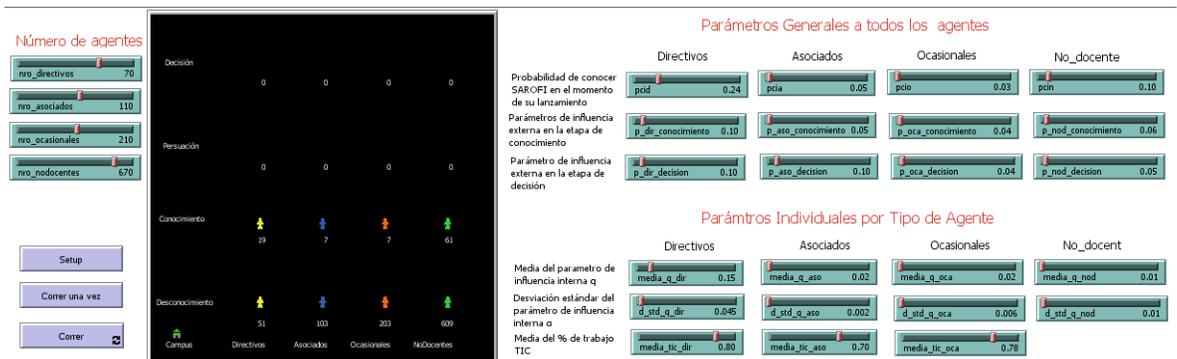


Figura 7. Iniciación, posicionamiento y distribución de agentes al ejecutar los procedimientos de la fase Setup

Fuente: interface del programa Netlogo 6.0.4

El procedimiento cumple con su finalidad y se verifica por su trazabilidad que fue bien programado y planeado en su código.

Creación de agentes en la categoría Asociados (*create-asociados*)

Este procedimiento consiste en la iniciación, aparición y asignación de estado inicial (Conocimiento o Desconocimiento) para los agentes de tipo Asociado, se realizan pruebas para garantizar el adecuado posicionamiento de los agentes y para garantizar que su distribución en los dos posibles estados iniciales corresponde con la proporción definida por la variable PCIA. Cuando se ordena la ejecución de los procedimientos de la fase *Setup*, puede verificarse que los agentes de la categoría Asociados se posicionan sobre una misma ubicación horizontal (eje x) y se distribuyen en los estados iniciales, tal y como se parecía en la Figura 7, donde también se puede observar que la proporción de agentes en el estado de Conocimiento ($7/110 = 0.06$) es consistente con el valor de la variable PCID = 0.05. El procedimiento cumple con su finalidad y se verifica por su trazabilidad que fue bien programado y planeado en su código.

Creación de agentes en la categoría Ocasionales (*create-ocasionales*)

Este procedimiento consiste en la iniciación, aparición y asignación de estado inicial (Conocimiento o Desconocimiento) para los agentes de tipo Ocasional, se realizan pruebas para garantizar el adecuado posicionamiento de los agentes y para garantizar que su distribución en los dos posibles estados iniciales corresponde con la proporción definida por la variable PCIO. Cuando se ordena la ejecución de los procedimientos de la fase Setup, puede verificarse que los agentes de la categoría Ocasionales se posicionan sobre una misma ubicación horizontal (eje x) y se distribuyen en los estados iniciales, tal y como se parecía en la Figura 7, donde también se puede observar que la proporción de agentes en el estado de Conocimiento ($7/210 = 0.03$) es consistente con el valor de la variable PCID = 0.03. El procedimiento cumple con su finalidad y se verifica por su trazabilidad que fue bien programado y planeado en su código.

Creación de agentes en la categoría NoDocentes (*create-nodocentes*)

Este procedimiento consiste en la iniciación, aparición y asignación de estado inicial (Conocimiento o Desconocimiento) para los agentes de tipo NoDocentes, se realizan pruebas para garantizar el adecuado posicionamiento de los agentes y para garantizar que su distribución en los dos posibles estados iniciales corresponde con la proporción definida por la variable PCIN. Cuando se ordena la ejecución de los procedimientos de la fase *Setup*, puede verificarse que los agentes de la categoría NoDocentes se posicionan sobre una misma ubicación horizontal (eje x) y se distribuyen en los estados iniciales, tal y como se parecía en la Figura 7, donde también se puede observar que la proporción de agentes en el estado de Conocimiento ($61/670 = 0.09$) es consistente con el valor de la variable PCID = 0.10. El procedimiento cumple con su finalidad y se verifica por su trazabilidad que fue bien programado y planeado en su código.

Fase Go

Actualización de estado de los agentes directivos (*actualizar_estado_directivos*)

El procedimiento consiste en aplicar las reglas de cambio de estado descritas en la sección 4.2.1.2 para todo agente de la categoría Directivos, se ocupa de tomar el estado actual del agente y aplicar las instrucciones que pueden llevarlo a alcanzar el siguiente estado definido, es de anotar que puede ocurrir que en una ejecución del procedimiento no se realice el cambio de estado, y que por el contrario este solo ocurra después de varias ejecuciones del mismo, realizándose cada una de ellas en un paso de reloj del sistema Netlogo, en donde se conocen como *ticks*. La verificación de este procedimiento se realizó haciendo seguimiento detallado a un agente de la categoría Directivos y validando que las decisiones de cambio de estado esperadas, coincidieran con el comportamiento reportado por las herramientas de monitoreo de agentes provistas por la herramientas Netlogo. En la Figura 8 se pueden observar las capturas de pantalla del momento de cambio de estado del agente obtenidas durante el seguimiento realizado. El procedimiento cumple con su finalidad y se verifica por su trazabilidad que fue bien programado y planeado en su código.

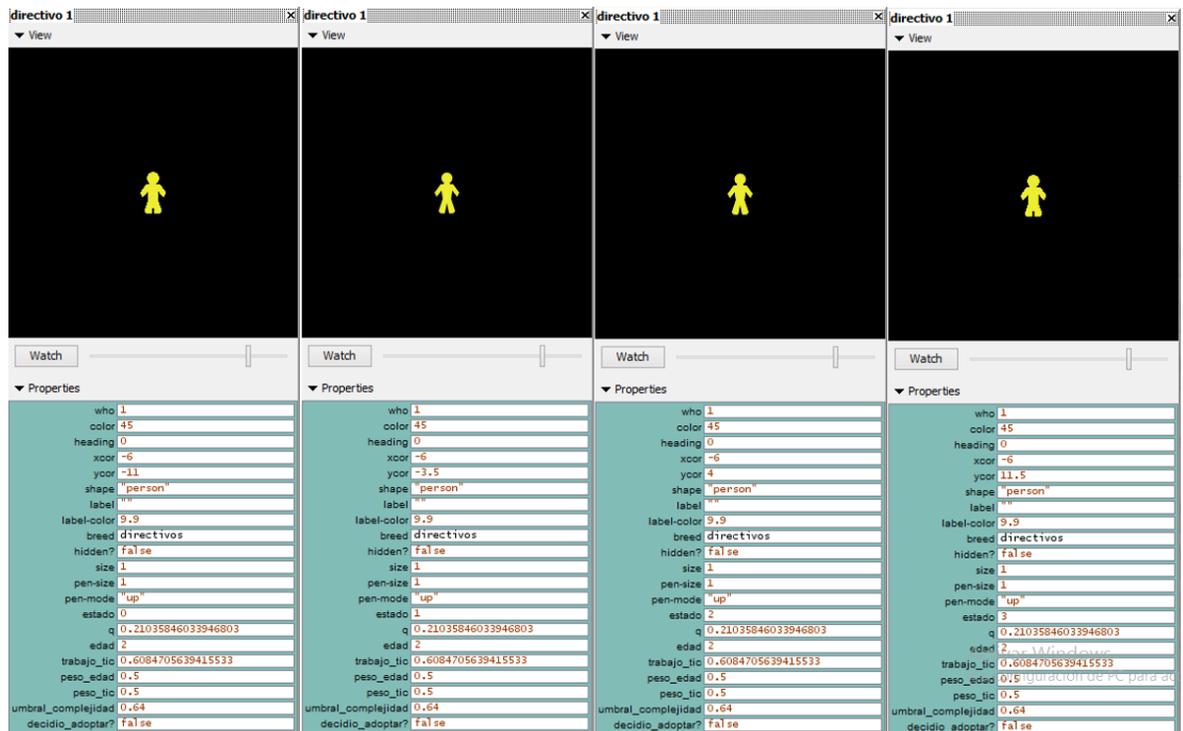


Figura 8. Seguimiento al cambio de estado de un agente de la categoría Directivos

Fuente: interface del programa Netlogo 6.0.4

Actualización de estado de los agentes asociados (actualizar_estado_asociados)

Al igual que ocurre para los Directivos, este procedimiento consiste en aplicar las reglas de cambio de estado descritas en la sección 4.2.1.2 para todo agente de la categoría Asociados, se ocupa de tomar el estado actual del agente y aplicar las instrucciones que pueden llevarlo a alcanzar el siguiente estado definido. La verificación de este procedimiento se realizó haciendo seguimiento detallado a un agente de la categoría Asociados y validando que las decisiones de cambio de estado esperadas, coincidieran con el comportamiento reportado por las herramientas de monitoreo de agentes provistas por la herramientas Netlogo.

En la Figura 9 se pueden observar las capturas de pantalla del momento de cambio de estado del agente obtenidas durante el seguimiento realizado. El procedimiento cumple con su finalidad y se verifica por su trazabilidad que fue bien programado y planeado en su código.

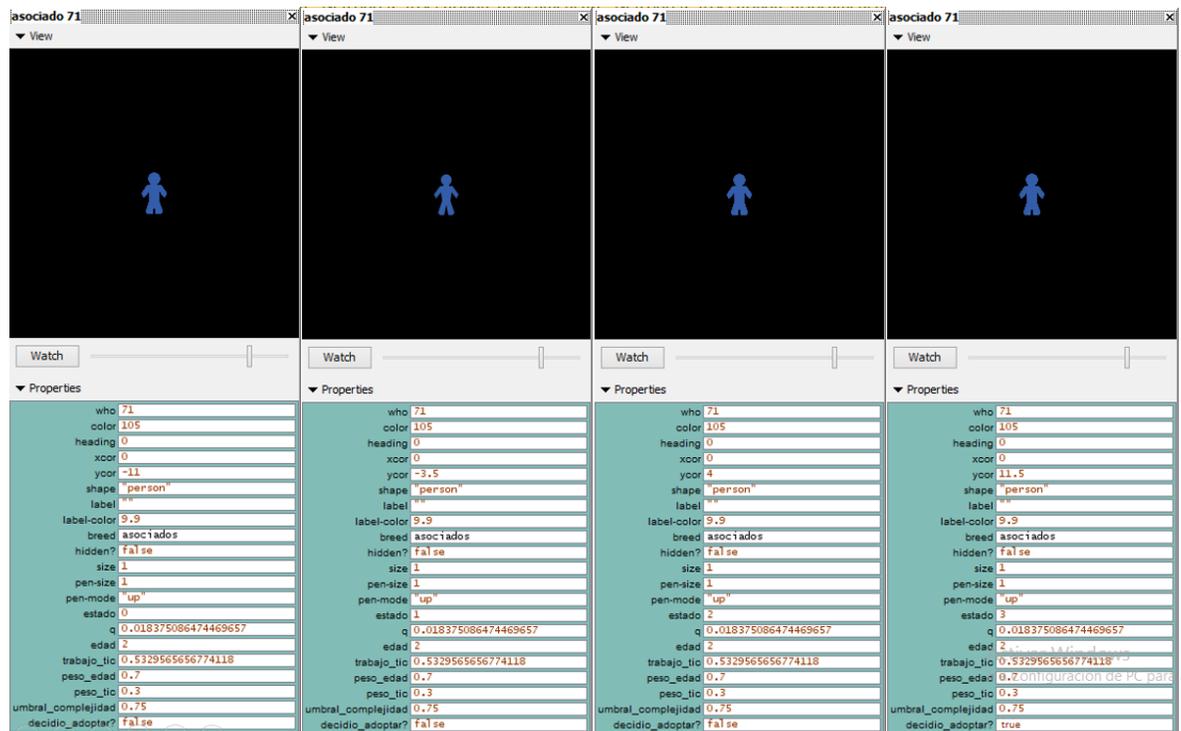


Figura 9. Seguimiento al cambio de estado de un agente de la categoría Asociados

Fuente: interface del programa Netlogo 6.0.4

Actualización de estado de los agentes ocasionales (*actualizar_estado_ocasionales*)

Del mismo modo el procedimiento que actualiza el estado de los asociados, este procedimiento consiste en aplicar las reglas de cambio de estado descritas en la sección 4.2.1.2 para todo agente de la categoría Ocasionales, se ocupa de tomar el estado actual del agente y aplicar las instrucciones que pueden llevarlo a alcanzar el siguiente estado definido.

En la Figura 10 se pueden observar las capturas de pantalla del momento de cambio de estado del agente obtenidas durante el seguimiento realizado. El procedimiento cumple con su finalidad y se verifica por su trazabilidad que fue bien programado y planeado en su código.

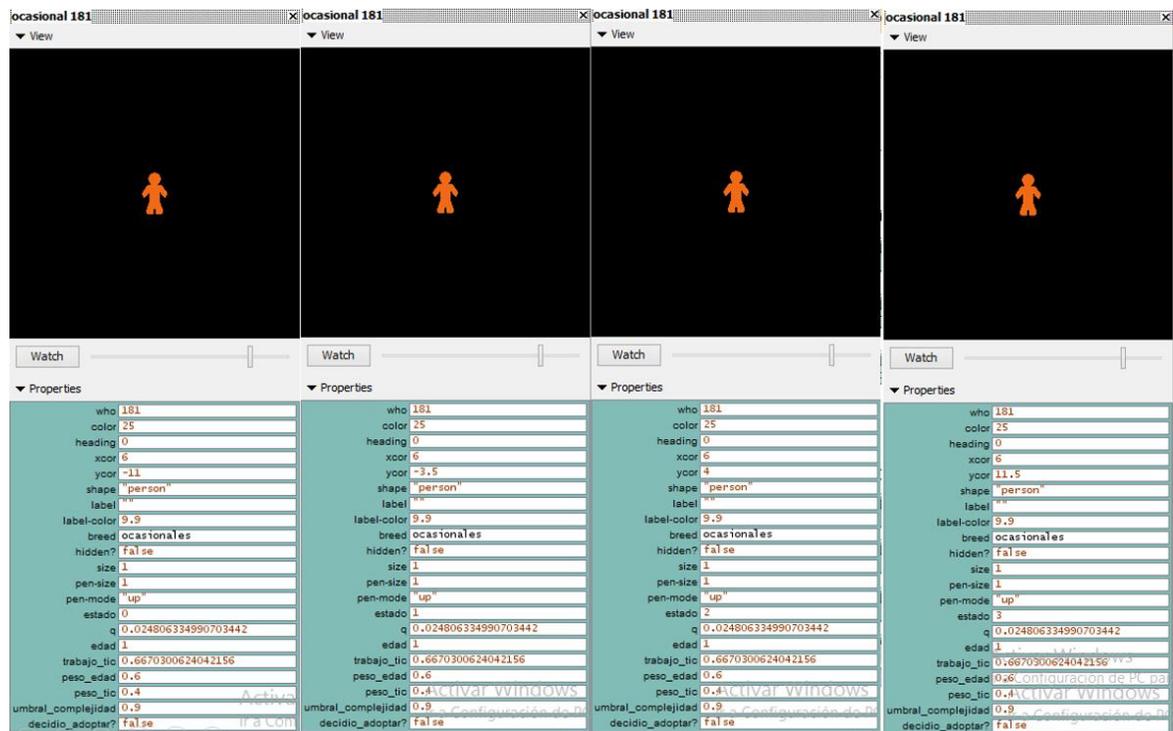


Figura 10. Seguimiento al cambio de estado de un agente de la categoría ocasionales

Fuente: interface del programa Netlogo 6.0.4

Actualización de estado de los agentes NoDocentes (*actualizar_estado_nodocentes*)

Finalmente se analiza el procedimiento asociado a los NoDocentes, el cual consiste en aplicar las reglas de cambio de estado descritas en la sección 4.2.1.2 para esta categoría, al igual que los demás procedimientos, se ocupa de tomar el estado actual del agente y aplicar las instrucciones que pueden llevarlo a alcanzar el siguiente estado definido. En la Figura 11 se pueden observar las capturas de pantalla del momento de cambio de estado del agente obtenidas durante el seguimiento realizado. El procedimiento cumple con su finalidad y se verifica por su trazabilidad que fue bien programado y planeado en su código.

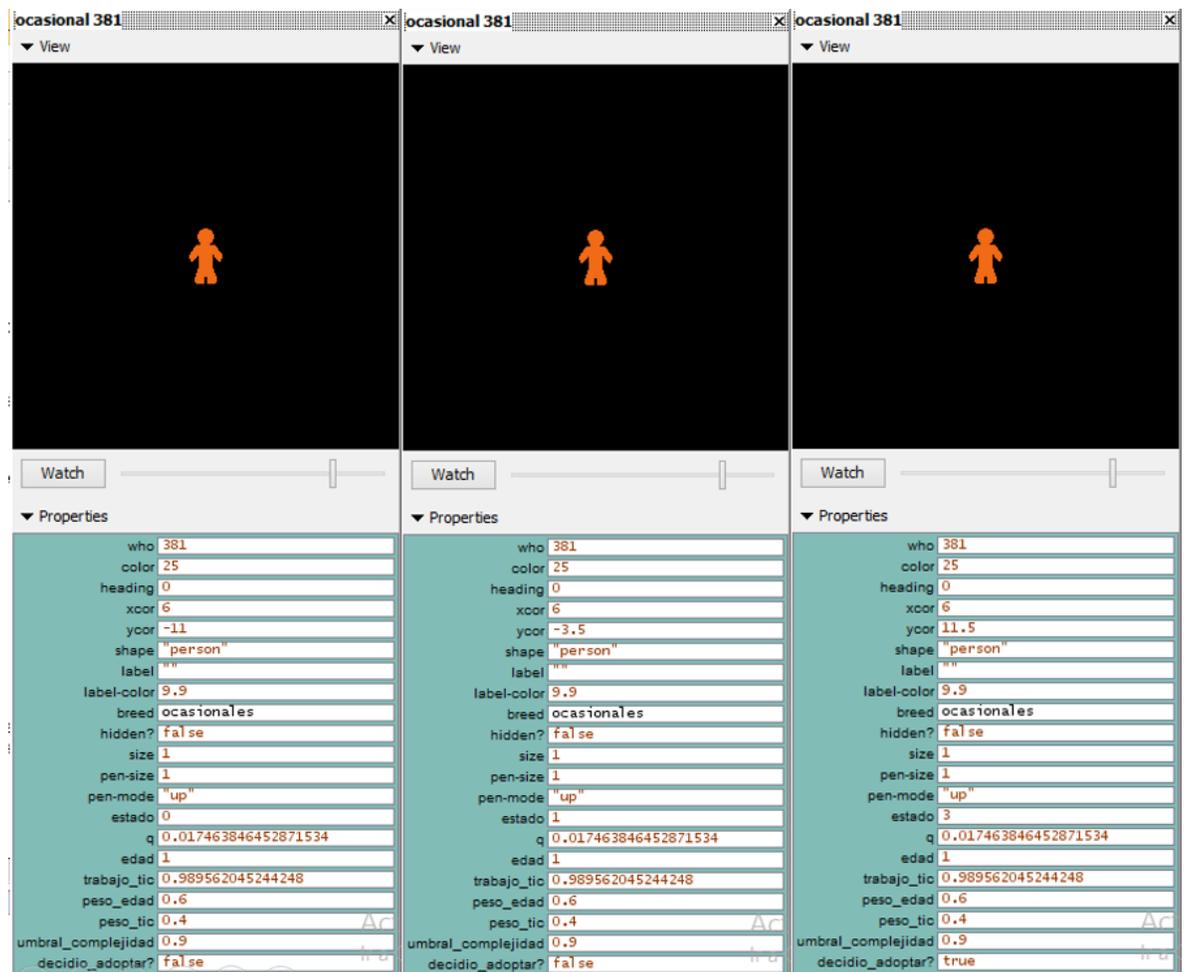


Figura 11. Seguimiento al cambio de estado de un agente de la categoría NoDocentes

Fuente: interface del programa Netlogo 6.0.4

Actualización de estado del agente entorno (*actualizar_estado_entorno*)

El procedimiento consiste modificar, en función del tiempo, tanto el color la figura de casa que aparece en el parte inferior izquierda del mundo de Netlogo, como el valor del parámetro p y umbral de complejidad para tres clasificaciones de agentes. Su verificación se realizó haciendo un seguimiento detallado del estado del entorno en cada momento del tiempo y las variables que se espera fueran modificadas por él. En la Figura 12 se pueden observar las capturas de pantalla del momento de cambio de estado del entorno obtenidas durante el seguimiento realizado y su impacto las

variables del modelo. El procedimiento cumple con su finalidad y se verifica por su trazabilidad que fue bien programado y planeado en su código.

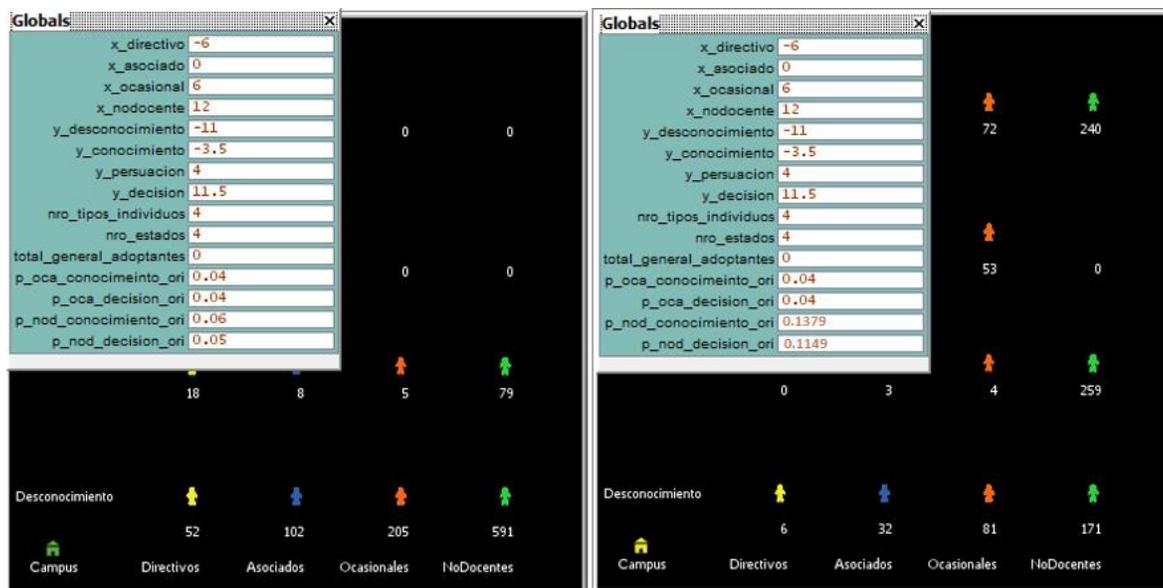


Figura 12. Seguimiento al cambio de estado del agente entorno

Fuente: interface del programa Netlogo 6.0.4

4.2.5. Validación Operativa

Como ya se indicó en la sección 4.1, la validación operativa es la tarea mediante la cual se determina si los comportamientos de las salidas del modelo computarizado tienen la suficiente precisión respecto al propósito previsto. En este caso la validación operativa se abordó a través de una validación de modelo cruzado (Knepell & Arango, 1993; Kiesling, 2011), una técnica orientada a verificar que la salida del modelo construido se puede ajustar razonablemente a la salida de un modelo previamente validado como el de Bass. Cabe anotar que en este proceso el modelo construido no se configuró con los parámetros que tratan de representar la realidad del proceso de difusión de la herramienta SAROFI, sino que sus parámetros se varían de modo que pueda generarse una salida que se ajuste a la predicha por el modelo de Bass, en específico se comparó la curva de adopción promedio que genera el modelo, contra la curva de adopción predicha por el modelo de BASS a través de la ecuación (5):

$$F(t) = \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t}} \quad (5)$$

Donde:

p : es el parámetro de influencia externa

q : es el parámetro de influencia interna

$F(t)$: es el porcentaje acumulado de adoptantes

Los valores de p y q usados en esta ecuación se varían utilizando la técnica de mínimos cuadrados (Srinivasan & Mason, 1986) de modo que la función resultante se ajuste de la mejor manera a los datos arrojados por las simulaciones que usan el modelo construido. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los datos arrojados por el proceso de validación operacional, para cada tipo de agente se muestran los parámetros configurados en el modelo y el valor de los parámetros p y q del modelo de Bass que me ofrecieron el mejor ajuste a la salida producida, indicando además el respectivo coeficiente de ajuste R^2 logrado.

Adicionalmente, la Figura 13 muestra las curvas de adopción acumulada arrojadas por el modelo construido y el modelo de Bass para agentes en la categoría Directivos, al aplicar los parámetros indicados la Tabla 1. Como se puede observar ambas curvas tiene un alto nivel de aproximación, tal y como se espera del valor del coeficiente de ajuste R^2 logrado 0.9794.

Tabla 1: Parámetros configurados en el modelo construido y parámetros del modelo de Bass que ofrecieron la mejor calidad de ajuste

	Parámetro	Directivos	Asociados	Ocasionales	NoDocentes
Parámetros configurados en el modelo construido	Probabilidad de conocer SAROFI en el momento de su lanzamiento	0,15	0,032	0,041	0,18
	Parámetro de influencia externa en la etapa de conocimiento	0,27	0,042	0,053	0,064
	Parámetro de influencia externa en la etapa de decisión	0,1	0,13	0,036	0,053
	Media del parámetro de influencia interna q	0,14	0,018	0,024	0,016
	Desviación estándar del parámetro de influencia interna q	0,05	0,006	0,004	0,012
	Media del % de trabajo TIC	0,8	0,7	0,78	N.A
	Desviación estándar del % de trabajo TIC	0,1	0,1	0,17	N.A
	Umbral complejidad de la innovación	0,64	0,75	0,64	N.A
Parámetros del modelo de Bass	parámetros de influencia externa p	0,12	0,04	0,035	0,01
	parámetros de influencia externa q	0,01	0,01	0,006	0,04
Calidad del ajuste	Coefficiente de ajuste R ²	0,9794	0,9765	0,9816	0,983

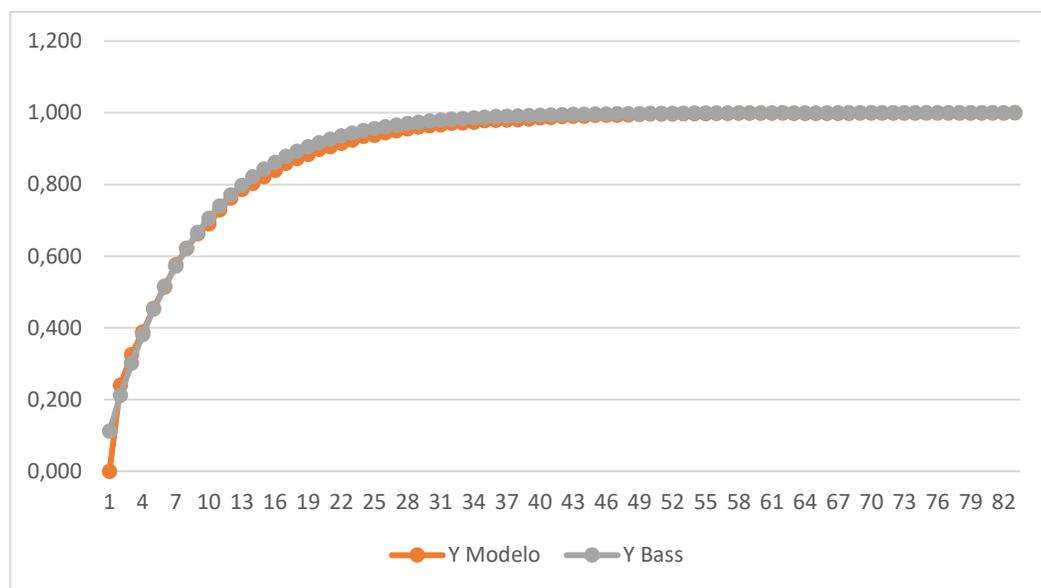


Figura 13. Curvas de adopción acumulada generadas por el modelo construido y modelo de Bass para agentes en la categoría Directivos

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, la Figura 14 muestra las curvas de adopción acumulada arrojadas por el modelo construido y el modelo de Bass para agentes en la categoría Asociados, al aplicar los parámetros indicados la Tabla 1. En este caso también se puede observar que

ambas curvas tienen un alto nivel de aproximación, tal y como se espera del valor del coeficiente de ajuste R^2 logrado 0.9765.

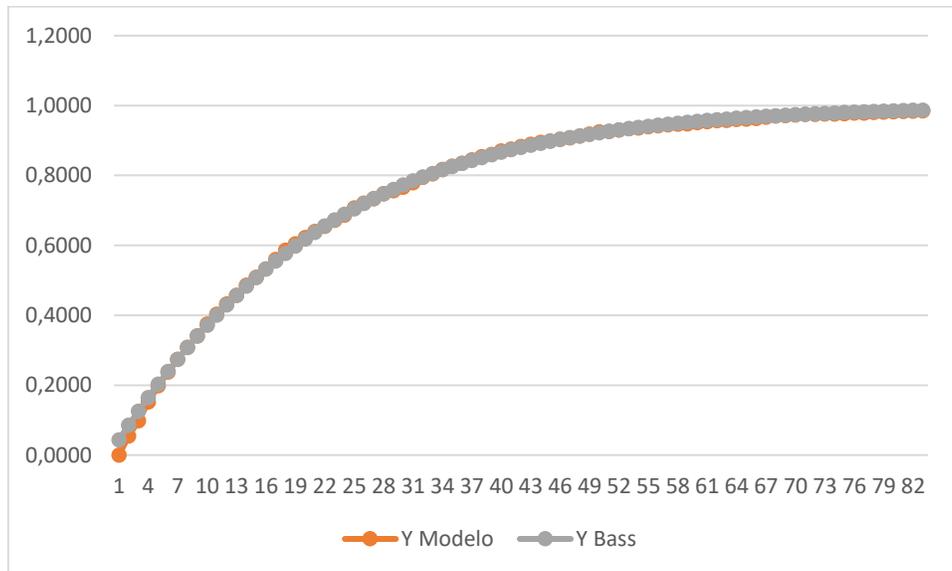


Figura 14. Curvas de adopción acumulada generadas por el modelo construido y modelo de Bass para agentes en la categoría Asociados

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la Figura 15 se muestran las curvas de adopción acumulada arrojadas por el modelo construido y el modelo de Bass para agentes en la categoría ocasionales, donde también se observa un alto nivel de aproximación, consistente con valor del coeficiente de ajuste R^2 logrado 0.9816

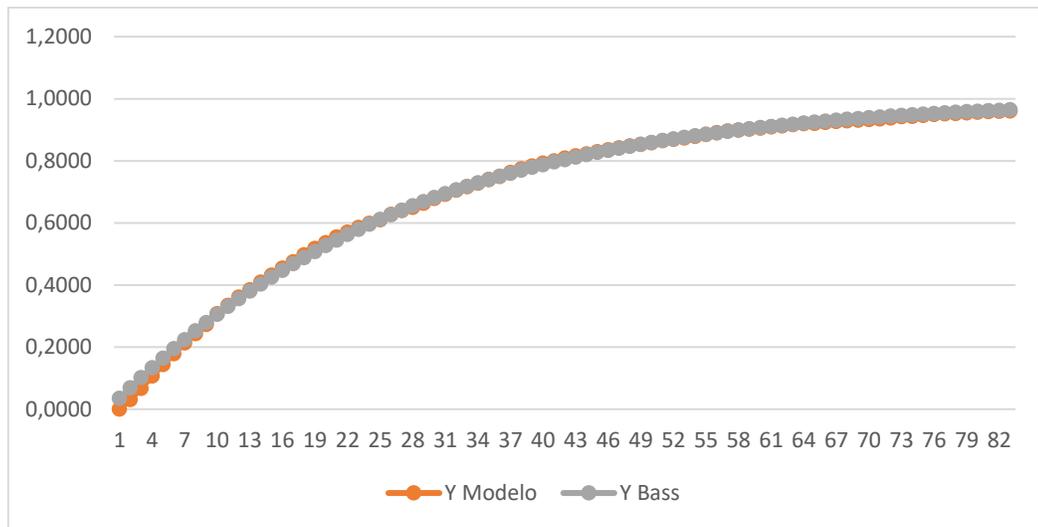


Figura 15. Curvas de adopción acumulada generadas por el modelo construido y modelo de Bass para agentes en la categoría Ocasionales

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 16 se muestran las curvas de adopción acumulada arrojadas por el modelo construido y el modelo de Bass para agentes en la categoría NoDocentes, donde al igual que las anteriores figuras, se observa un alto nivel de aproximación, consistente con valor del coeficiente de ajuste R^2 logrado 0.983.

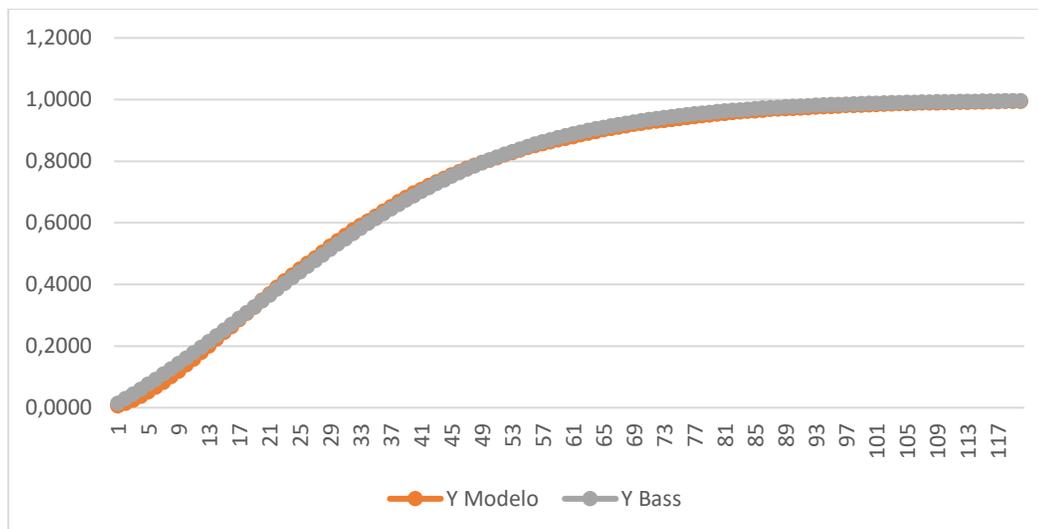


Figura 16. Curvas de adopción acumulada generadas por el modelo construido y modelo de Bass para agentes en la categoría NoDocentes

Fuente: Elaboración propia

En razón a lo anterior, y ante el hecho de que todos los coeficientes de ajuste R^2 logrados se encuentran por encima de 0.97, se concluye que la salida del modelo construido para cada una de las diferentes categorías, se ajusta razonablemente a la salida de uno de los modelos validados más maduros en el área de la difusión de la innovación, como es el modelo de Bass, por lo que validación operativa se considera satisfactoria.

4.3. Análisis de patrones de adopción

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones realizadas usando el modelo construido sobre tres escenarios elegidos para cada categoría de agente: un escenario que busca imitar la realidad, un escenario deseable de adopción y uno indeseable. Esta tarea tiene como objetivo comparar los escenarios y poder hacer así un análisis acerca de la adopción de la tecnología de teletrabajo SAROFI. Las simulaciones se realizan en el programa NetLogo 6.0.4 y pueden ser consideradas como una exploración y abstracción del fenómeno virtual simplificado (Resnick, 2001) para manipularlo. Por tal razón, se puede decir que es una exploración del fenómeno en un micromundo virtual.

Escenario que imita la realidad

Se trata de un escenario en el que se utiliza el modelo para realizar simulaciones e imitar de forma aceptable la curva de adopción ocurrida en la realidad cuando se dio la difusión de la herramienta SAROFI, es de anotar que el ajuste entre la curva de adopción arrojada por el modelo y la observa en la realidad se logra mediante un proceso iterativo en donde se modifican parámetros asociados a variables factibles de intervenir en la realidad del sistema en que se dio la difusión de SAROFI, como lo son la probabilidad de conocer la herramienta al momento de su lanzamiento y los parámetros de influencia externa en los diferentes estados, los parámetros asociados a variables cuya intervención no era factible como la edad de los agentes permanecieron sin cambios. Cabe resaltar que este escenario se convierte en la línea de base para establecer los escenarios de adopción deseable e indeseable.

Escenario deseable

Teniendo en cuenta que la herramienta SAROFI fue adoptada por la total de la población a la que estaba dirigida, se considera como un escenario deseable aquel su difusión es significativamente más rápida que como ocurrió en la realidad, lo que significa que un menor tiempo se obtuvo una mayor porción de adoptantes. Cabe anotar que como ocurre en la identificación del escenario que imita la realidad, la identificación de este escenario se realiza sólo mediante cambios en parámetros asociados a variables factibles de ser intervenidas en la realidad.

Escenario indeseable

En concordancia con la descripción del escenario deseable, un escenario indeseable se trata de aquel en que la difusión de la herramienta SAROFI es significativamente más lenta que la observada en la realidad, lo que significa que un mayor tiempo se obtuvo una menor porción de adoptantes. Al igual que en la identificación de los dos escenarios ya citados, en este caso sólo se realizaron cambios en parámetros asociados a variables factibles de ser intervenidas en la realidad

Las simulaciones realizadas para cada escenario se enfocan en obtener una salida promedio del modelo, la cual se produce al ejecutar la simulación 20 veces y luego promediar el número de adoptantes total en cada momento del tiempo, generando de esta forma una curva de adopción promedio.

4.3.1. Escenarios simulados para Directivos

En la Figura 17 se presenta la curva de adopción observada para Directivos en la realidad de la difusión de la innovación SAROFI, acompañada de la curvas de adopción promedio obtenidas para cada escenario simulado.

Como se puede observar, se logró obtener un escenario de simulación que produce una curva de adopción acumulada promedio que se ajusta a la curva de adopción acumulada observada en la realidad.

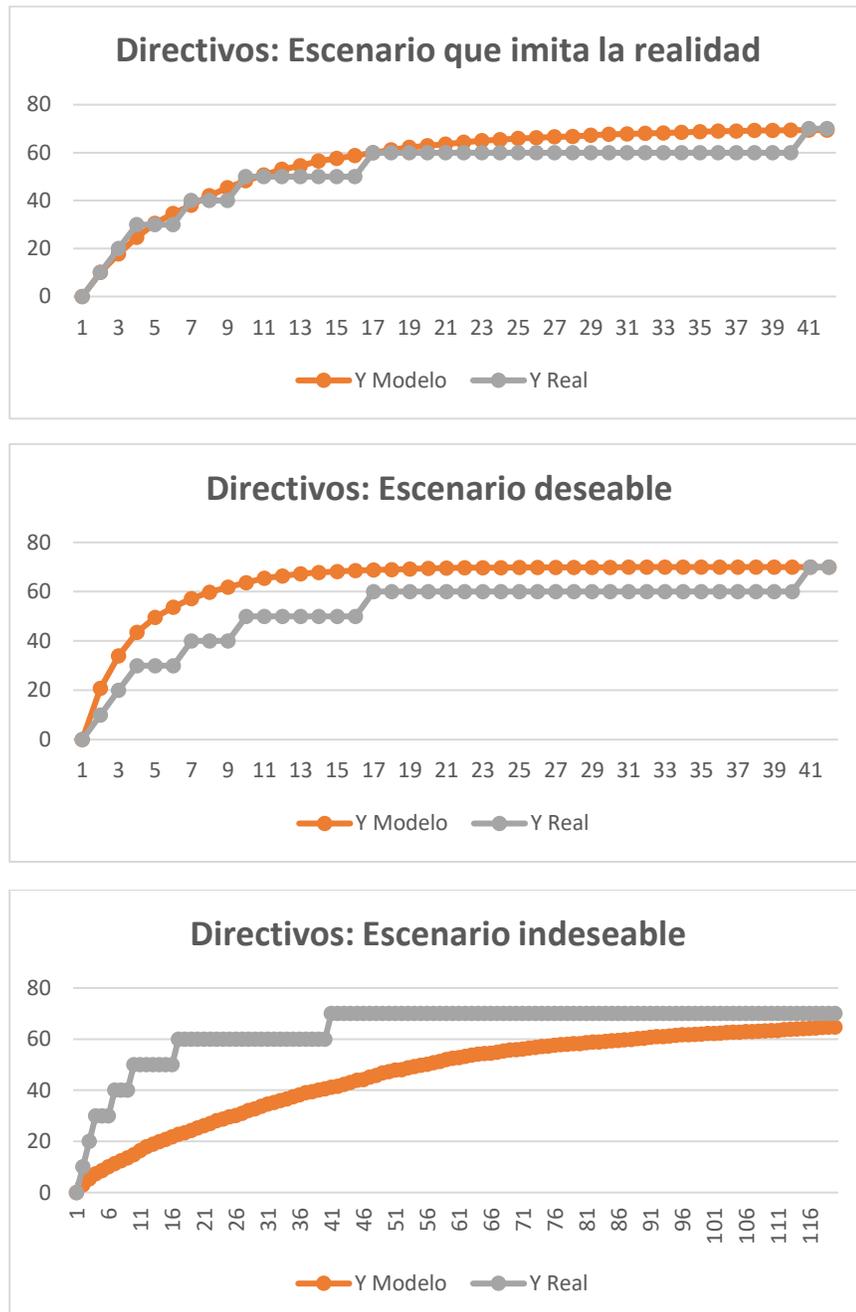


Figura 17. Curvas de adopción para distintos escenarios simulados asociados a los Directivos

Fuente: Elaboración propia

Es de anotar que apariencia escalonada de la curva observada en la realidad se debe a que corresponde una única instancia del proceso de difusión, mientras que la apariencia suavizada de la curva de adopción promedio se debe a que proviene de la media de los datos arrojados al ejecutar la simulación 20 veces. Cabe anotar que por esta razón, la misma diferencia en la apariencia de las curvas se presentará todas las demás comparaciones.

Adicionalmente, como se puede observar también se logró definir un escenario de simulación deseable en el que la difusión completa de la innovación SAROFI se logra tan solo en la semana 20 (punto del eje x asociado al tiempo), que contrasta con las 41 semanas que se tomó la difusión completa en la realidad, es decir se trata de un escenario donde la difusión completa se logra en la mitad de tiempo.

De otro lado, y como se muestra al final de la Figura 17, también se logró definir un escenario indeseable en el que la innovación toma en difundirse completamente 116 semanas en contraste con las 41 que se tomó en la realidad. Las combinaciones de parámetros utilizadas el modelo de simulación para cada uno de los escenarios se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros configurados en el modelo de simulación para cada escenario asociado a Directivos.

Directivos			
Parámetro	Escenario que imita la realidad	Escenario deseable	Escenario indeseable
Probabilidad de conocer SAROFI en el momento de su lanzamiento	0,15	0,3	0,05
Parámetro de influencia externa en la etapa de conocimiento	0,1	0,2	0,02
Parámetro de influencia externa en la etapa de decisión	0,1	0,2	0,02
Media del parámetro de influencia interna q	0,15	Sin cambios	Sin cambios
Desviación estándar del parámetro de influencia interna q	0,045	Sin cambios	Sin cambios
Media del % de trabajo TIC	0,8	Sin cambios	Sin cambios
Desviación estándar del % de trabajo TIC	0,1	Sin cambios	Sin cambios
Umbral complejidad de la innovación	0,64	0,64	0,64

4.3.2. Escenarios simulados para Asociados

En la Figura 18 se presenta la curva de adopción observada para Asociados en la realidad de la difusión de la innovación SAROFI acompañada de las curvas de adopción promedio obtenidas para cada escenario simulado.

Del mismo modo que ocurrió con las simulaciones asociadas a Directivos, en este caso se logró establecer un escenario de simulación que imita la realidad de la difusión de SAROFI, el cual genera una curva de adopción acumulada que se aproxima de forma aceptable a la curva observada en la realidad de la difusión de esta herramienta, incluyendo un ligero aumento del ritmo de adopción que se produce entre la semana 20 y la semana 39, el cual coincide con un periodo de aumento en probabilidad de cierre del campus universitario. Este incremento sólo pudo reproducirse por el modelo mediante el incremento temporal de la utilidad que los potenciales adoptantes encuentran en la innovación, así como el aumento transitorio de la influencia externa que actúa sobre ellos.

Con respecto al escenario deseable para los Asociados, se logró establecer un escenario en el que el 90% de la población ha adoptado la innovación apenas en la semana 27, mientras que en la realidad esta cifra sólo se alcanza en la semana 87. Además la difusión completa de la innovación se alcanza en la semana 76, mientras que en la realidad para los individuos de esta categoría se alcanzó en la semana 108. Para este escenario se mantuvo el esquema de modificación transitorio de algunos parámetros entre la semana 20 y 39.

Con respecto al escenario indeseable para los Asociados, se logró establecer un escenario en el que durante el tiempo programado de simulación, que corresponde con el tiempo que duró el fenómeno real, sólo se pudo alcanzar un nivel de adopción del 72.72% representado en 80 individuos. Nótese que este escenario se caracteriza por la incipiente adopción de la innovación en sus inicios que es significativamente inferior a la observada en la realidad. Las combinaciones de parámetros utilizadas en el modelo de simulación para cada uno de los escenarios se muestra en la Tabla 3.

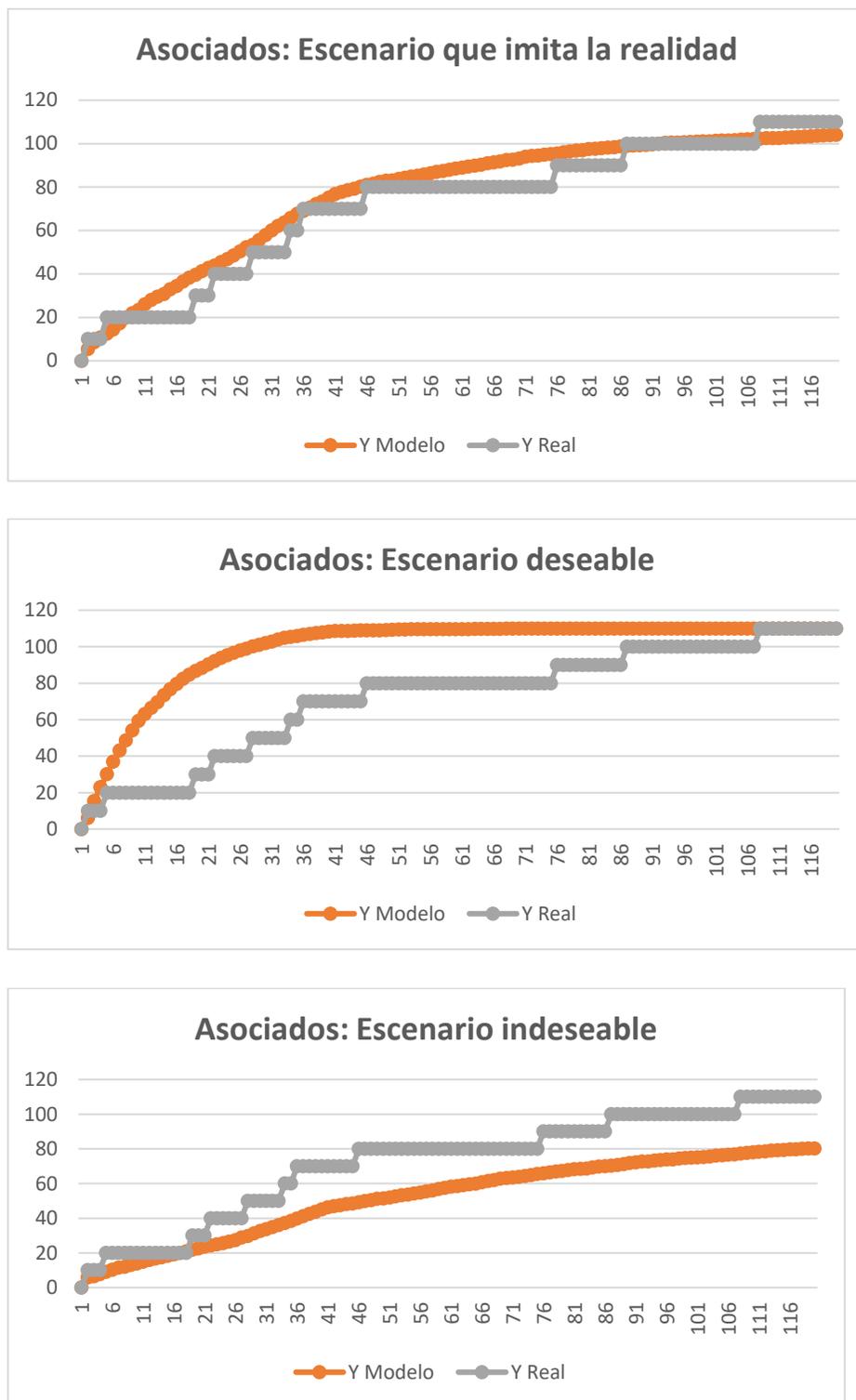


Figura 18. Curvas de adopción para distintos escenarios simulados asociados a los Asociados

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3: Parámetros configurados en el modelo de simulación para cada escenario asociado a Asociados

Asociados			
Parámetro	Escenario que imita la realidad	Escenario deseable	Escenario indeseable
Probabilidad de conocer SAROFI en el momento de su lanzamiento	0,045	0,05	0,05
Parámetro de influencia externa en la etapa de conocimiento	0,022*	0,1*	0,01*
Parámetro de influencia externa en la etapa de decisión	0,011*	0,08*	0,005*
Media del parámetro de influencia interna q	0,02	Sin cambios	Sin cambios
Desviación estándar del parámetro de influencia interna q	0,0064	Sin cambios	Sin cambios
Media del % de trabajo TIC	0,7	Sin cambios	Sin cambios
Desviación estándar del % de trabajo TIC	0,1	Sin cambios	Sin cambios
Umbral complejidad de la innovación	0,75*	0,75*	0,75*

* Estos valores base sufren ligeras modificaciones entre la semana 20 y la 39 inducidas por cambios generados el agente entorno.

4.3.3. Escenarios simulados para Ocasionales

En la Figura 19 se presenta la curva de adopción observada para Ocasionales en la realidad de la difusión de la innovación SAROFI acompañada de la curvas de adopción promedio obtenidas para cada escenario simulado.

Al igual que en los casos anteriores, se logró establecer un escenario de simulación que imita lo ocurrido en la realidad y produce una curva de adopción acumulada aceptablemente similar a la curva asociada a la difusión observada de SAROFI para los individuos en la categoría Ocasionales. Es de resaltar que entre las semanas 20 y 39, se observa un aumento importante en el ritmo de adopción, el cual es imitado por la curva promedio arrojada por el modelo de simulación través de mecanismos ejecutados por el agente Entorno que aumentan transitoriamente los parámetros de influencia externa y reducen los umbrales de complejidad que aplican los individuos al momento de evaluar la innovación. Es de anotar que el lapso entre la semana 20 y

39 del proceso de difusión coincide con un periodo en el que aumentó de la probabilidad de cierres del campus universitario.

En el caso del escenario deseable se conservó el esquema de modificación transitoria de parámetros entre la semana 20 y 39, con el fin de mantener este rasgo de la simulación por haber sido un fenómeno observado en la realidad. Para este escenario se logró que un 90% de los individuos (189) adoptara la innovación en la semana 55, mientras que esta cifra sólo se alcanzó en la realidad en la semana 99. Como se puede observar en la Figura 19 la curva arrojada por el modelo de simulación también presenta un aumento subido en el ritmo de adopción entre la citada franja de semanas, demostrando con esto el efecto de mantener la modificación transitoria de los parámetros.

Con respecto al escenario indeseable, también se conservó el esquema de modificación transitoria de parámetros, logrando el mismo efecto de aumento del ritmo de adopción entre las semanas 20 y 29. No obstante para este escenario, al final de periodo programado de simulación de 120 semanas sólo se logró que el 70% (147) de los individuos en la categoría Ocasionales adoptara la innovación. Las combinaciones de parámetros utilizadas el modelo de simulación para cada uno de los escenarios se muestra en la Tabla 4, donde $fpc(t)$ corresponde a una función que modifica el parámetro de influencia externa en la etapa de conocimiento en función del tiempo, $fpc(t)$ corresponde a una función que modifica el parámetro de influencia externa en la etapa de conocimiento en función del tiempo y $fuc(t)$ corresponde a una función que modifica el umbral de complejidad en función del tiempo.

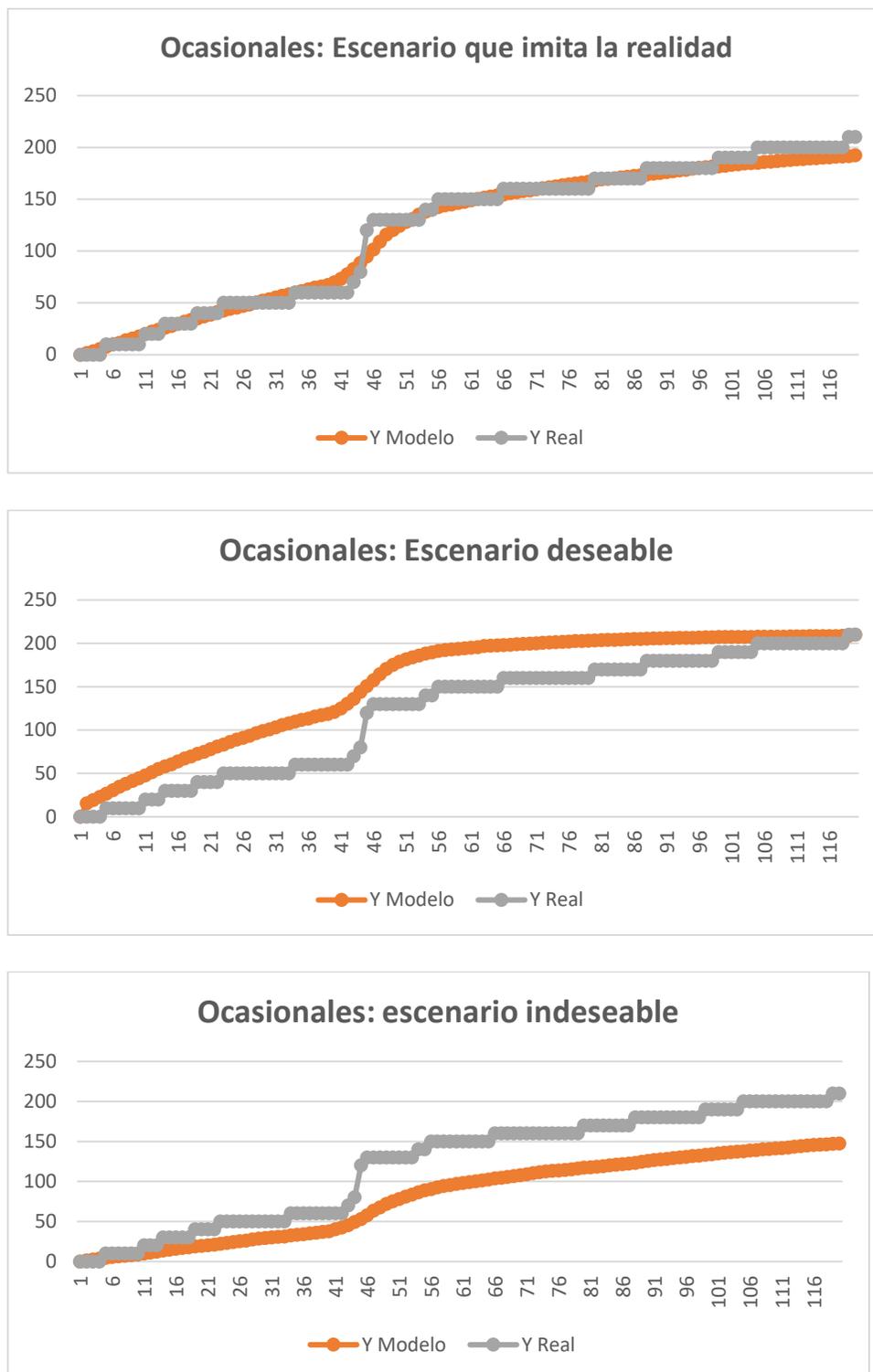


Figura 19. Curvas de adopción para distintos escenarios simulados asociados a los Ocasionales

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4: Parámetros configurados en el modelo de simulación para cada escenario asociado Ocasionales

Ocasionales			
Parámetro	Escenario que imita la realidad	Escenario deseable	Escenario indeseable
Probabilidad de conocer SAROFI en el momento de su lanzamiento	0,01	0,07	0,005
Parámetro de influencia externa en la etapa de conocimiento	$fpc(t)$	$fpc(t)$	$fpc(t)$
Parámetro de influencia externa en la etapa de decisión	$fpd(t)$	$fpd(t)$	$fpd(t)$
Media del parámetro de influencia interna q	0,01	Sin cambios	Sin cambios
Desviación estándar del parámetro de influencia interna q	0,006	Sin cambios	Sin cambios
Media del % de trabajo TIC	0,7	Sin cambios	Sin cambios
Desviación estándar del % de trabajo TIC	0,1	Sin cambios	Sin cambios
Umbral complejidad de la innovación	$fuc(t)$	$fuc(t)$	$fuc(t)$

4.3.4. Escenarios simulados para NoDocentes

En la Figura 20 se presenta la curva de adopción observada para NoDocentes en la realidad de la difusión de la innovación SAROFI acompañada de las curvas de adopción promedio obtenidas para cada escenario simulado. Cabe recordar que según el modelo construido, el proceso de adopción que ejecutan los NoDocentes es significativamente más simple que el de los individuos de las demás categorías, no obstante se lograron establecer los mismos tres escenarios que fueron descritos para todas las demás categorías.

En lo que respecta al escenario que imita la realidad, también se logró generar una curva acumulada de adopción promedio que se ajusta a la curva de adopción observada en la realidad, sin embargo es importante anotar que para lograrlo fue indispensable aplicar un esquema de modificación transitoria de parámetros entre la semana 20 y la 39, del mismo que fue necesario hacerlo para el caso de los escenarios asociados a los Ocasionales.

Para el caso del escenario deseable, también se mantuvo el esquema de modificación transitoria de parámetros y se logró que para este escenario se alcanzara la adopción del 90% (594) de los adoptantes en la semana 37, mientras que en la realidad esto ocurrió en la semana 100. Además, la difusión plena de la innovación se alcanzó en la semana 69, mientras que en la realidad esta cifra sólo se alcanzó en la semana 117.

Sobre el escenario indeseable, al igual que en los dos anteriores, se mantuvo el esquema de modificación transitoria de parámetros y se pudieron realizar simulaciones en las que durante el tiempo programado de simulación sólo se logró la adopción de 80.6% (537) individuos, aunque la curva obtenida también presentó un periodo de aumento del ritmo de adopción alrededor de la semana 30. Las combinaciones de parámetros utilizadas en el modelo de simulación para cada uno de los escenarios se muestra en la Tabla 5, donde $fpc(t)$ corresponde a una función que modifica el parámetro de influencia externa en la etapa de conocimiento en función del tiempo y $fpc(t)$ corresponde a una función que modifica el parámetro de influencia externa en la etapa de conocimiento en función del tiempo.

4.3.5. Identificación y análisis de patrones de adopción

A partir del conocimiento obtenido mediante el establecimiento, validación y ajuste de las simulaciones asociadas a cada uno de los escenarios descritos, se procedió a realizar una identificación y análisis de los patrones asociados al proceso de difusión de la innovación SAROFI, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6 indicando para caso un nombre asignado al patrón, una descripción y un análisis.

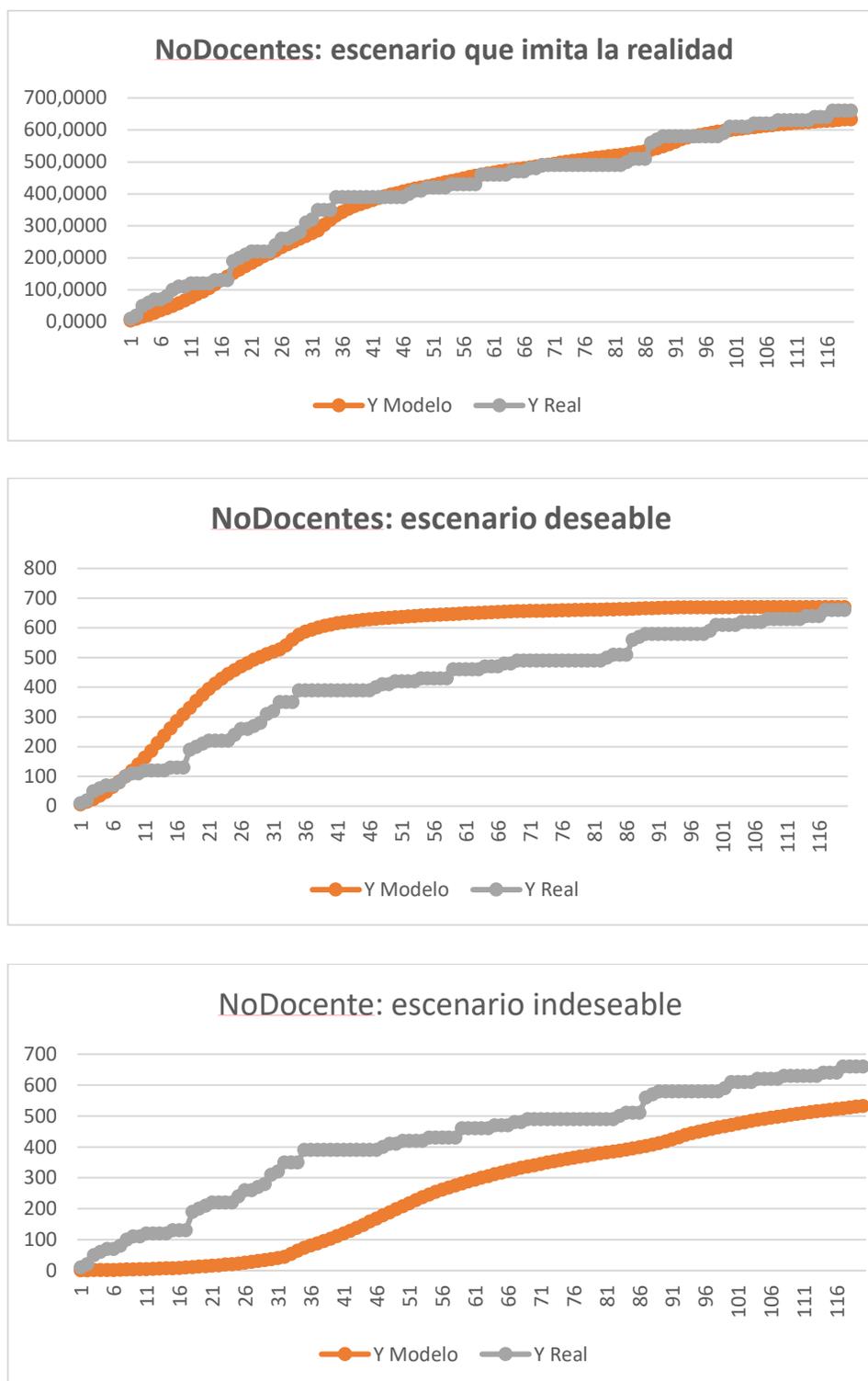


Figura 20. Curvas de adopción para distintos escenarios simulados asociados a los NoDocentes

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Parámetros configurados en el modelo de simulación para cada escenario asociado NoDocentes

NoDocentes			
Parámetro	Escenario que imita la realidad	Escenario deseable	Escenario indeseable
Probabilidad de conocer SAROFI en el momento de su lanzamiento	0,2	0,3	0,05
Parámetro de influencia externa en la etapa de conocimiento	$fpc(t)$	$fpc(t)$	$fpc(t)$
Parámetro de influencia externa en la etapa de decisión	$fpd(t)$	$fpd(t)$	$fpd(t)$
Media del parámetro de influencia interna q	0,29	Sin cambios	Sin cambios
Desviación estándar del parámetro de influencia interna q	0,1	Sin cambios	Sin cambios

Tabla 6: Identificación y análisis de patrones de adopción

Identificación y análisis de patrones de adopción		
Nombre	Descripción	Análisis
Diversidad de curvas por categoría	En las distintas simulaciones realizadas se observó que todas las curvas de adopción acumulada para las diferentes categorías de individuos, son significativamente distintas, y que esta diversidad se mantiene incluso en las curvas modificadas que son generadas para los diversos escenarios en los cuales se usaron diferentes parámetros	El hallazgo indica que los procesos de difusión de SAROFI desarrollados por cada una de las cuatro categorías de individuos definidas, son estructuralmente distintos y que la heterogeneidad de la población impactó el proceso de adopción en cada caso, determinando aspectos su la velocidad y estacionalidad. Esta idea es apoyada no solo por la fuerte disparidad en el valor de algunos de los parámetros que comparten distintas categorías (como la influencia externa p y la influencia interna q), sino también por la sensibilidad diferenciada de las curvas asociadas a diferentes categorías ante los mismos cambios del entorno.

Identificación y análisis de patrones de adopción		
Nombre	Descripción	Análisis
Forma de las curvas constantes con modificaciones en su altura	En las distintas simulaciones realizadas se observó que las formas básicas de las curvas de adopción acumulada para cada categoría de individuo, se mantenían constantes y que los cambios asociados a los diferentes escenarios afectaban básicamente su altura.	El hallazgo indica que la forma de curva de adopción observada para cada categoría de individuos está determinada en gran medida por unas cualidades de la población, y que las variaciones situacionales afectan principalmente la velocidad del proceso de adopción. Esta idea es apoyada por el hecho de que las modificaciones de parámetros introducidas para establecer los distintos escenarios, por regla no modificar aspectos propios de la población, como la edad o los parámetros de influencia interna q , lo que hace pensar que en la definición de los distintos escenarios de simulación se mantuvo la esencia de cada población.
Curvas de adopción con inicios a ritmos importantes para el escenario que imita la realidad y el deseable	En las simulaciones realizadas se observó que las curvas de adopción asociadas a los escenarios que imitan la realidad y los escenarios deseables para las diferentes categorías de individuos, poseen inicios con ritmos de adopción importantes en la zona de la curva que normalmente se asocia a los adoptantes tempranos, una zona para la que según la teoría se esperaría un inicio con una tasa de adopción más modesta.	El hallazgo indica que en poblaciones relativamente pequeñas como las analizadas en este trabajo, los esfuerzos de comunicación iniciales podrían tener un impacto significativo al impulsar las adopciones iniciales y podrían además determinar en parte el futuro del proceso de difusión. Esta idea es apoyada por el hecho de las modificaciones realizadas a los parámetros asociados a la probabilidad de conocer la innovación en el momento de su lanzamiento y a los parámetros de influencia externa p en los estados iniciales, demostraron tener un impacto determinante en el proceso de adopción.
Incrementos del ritmo de adopción en los mismos lapsos de tiempo	En las curvas de adopción reales de los individuos de las categorías Asociados, Ocasionales y NoDocentes se observó un incremento del ritmo de adopción entre las semanas 20 y 39, el cual sólo pudo ser reproducido por el modelo de simulación mediante la reducción transitoria del umbral de complejidad de la innovación y el aumento temporal de los parámetros de influencia externa p .	El hallazgo indica que la principal razón detrás de la fase de crecimiento rápido observado en las curvas de adopción, es el incremento de la probabilidad de cierre del campus universitario, que consecuentemente produce el incremento temporal de la utilidad que los potenciales adoptantes encuentran en la innovación, así como el aumento transitorio de la influencia externa que actúa sobre ellos.

5. Conclusiones

- A partir de la investigación se logró establecer un estado del arte que describe ampliamente el uso de los modelos basados en agentes en el tema específico de la difusión de la innovación. Todo esto a partir del marco teórico donde se consolidaron los fundamentos, conceptos, teorías y modelos relativos a la difusión de innovación. De este modo se pudo obtener no solo un entendimiento de los modelos desarrollados ahora y sus aplicaciones, sino también el soporte teórico que sirvió de base para construir el modelo basado en agentes desarrollado en el trabajo.
- La literatura existente sobre la de difusión de la innovación ofrece una rica fuente para la construcción de modelos de difusión basados en agentes, ya que provee múltiples teorías y aproximaciones que sirven de soporte para la construcción de modelos conceptuales sobre la materia, toda vez que ofrece trabajos sobre el comportamiento propio de los adoptantes, las formas en que pueden relacionarse entre sí y con el entorno, las consecuencias de este relacionamiento en su comportamiento y además la forma en que puede afectarlo algunos factores del entorno.
- El estado del arte que se logró establecer, permitió observar que existe una gran cantidad de trabajos publicados recientemente que describen modelos basados en agentes aplicados a la difusión de la innovación, lo que demuestra que esta es un área de investigación científica que está vigente y en pleno desarrollo, en la que se encuentra no solo una diversidad de enfoques, sino también una diversidad de aplicaciones incluyendo diferentes aspectos de interés en la actualidad como al difusión de las tecnologías orientadas al cuidado del medio ambiente.
- Se logró construir un modelo de difusión de la innovación basado en agentes orientado a la difusión de la herramienta de teletrabajo SAROFI, que para cada una de las categorías de individuos definidas demostró ser capaz de generar curvas de adopción acumulada

que se ajustan a las producidas por el modelo clásico de BASS, obteniendo un coeficiente de ajuste R^2 mínimo de 0.9765, de lo cual se dedujo que el modelo construido es válido desde el punto de vista operativo.

- El modelo construido logró ser parametrizado de modo que la curva de adopción promedio que genera se aproxima razonablemente a la observada en la realidad del proceso de difusión de SAROFI, para cada una de las cuatro categorías de individuos que fueron definidas. Lo que permitió evidenciar que los parámetros asociados a cada categoría son significativamente distintos, lo que indica que efectivamente la heterogeneidad de la población impacta el proceso de difusión de SAROFI.
- En las curvas de adopción reales de los individuos de las categorías Asociados, Ocasionales y NoDocentes se observó un incremento del ritmo de adopción entre las semanas 20 y 39, el cual sólo pudo ser reproducido por el modelo de simulación mediante la reducción transitoria del umbral de complejidad de la innovación y el aumento temporal de los parámetros de influencia externa p .
- Los resultados arrojados por las simulaciones del proceso de difusión de SAROFI usando el modelo construido, sugieren que la principal razón detrás de la fase de crecimiento rápido observado en sus curvas de adopción, el incremento de la probabilidad de cierre del campus universitario, que consecuentemente produce el incremento temporal de la utilidad que los potenciales adoptantes encuentran en la innovación, así como el aumento transitorio de la influencia externa que actúa sobre ellos.
- Se lograron establecer para cada una de las categorías de individuos definidas, tres escenarios de difusión: uno que imitan la realidad del proceso de adopción de SAROFI, uno deseable en donde el proceso de adopción es significativamente más rápido y uno indeseable en donde el proceso de adopción es significativamente más lento. Cada uno de ellos asociado a un juego de valores de parámetros particular, un proceso de permitió adelantar un análisis de patrones de adopción para el caso de estudio particular.

- En las distintas simulaciones realizadas usando el modelo construido sobre los diferentes escenarios, se observó que las formas básicas de las curvas de adopción acumulada para cada categoría de individuo, en general se mantenían constantes y que los cambios asociados a los diferentes escenarios afectaban básicamente su altura. Esto indica que la forma de curva de adopción observada para cada categoría de individuos, podría estar determinada en gran medida por unas cualidades de la población y que las variaciones situacionales afectan principalmente la velocidad del proceso de adopción.
- En las distintas simulaciones realizadas usando el modelo construido sobre los diferentes escenarios, se observó que las curvas de adopción asociadas a los escenarios que imitan la realidad y los escenarios deseables, poseen inicios con ritmos de adopción importantes en la zona de la curva que normalmente se asocia a los adoptantes tempranos, una zona para la que según la teoría, en un proceso típico, se esperaría un inicio con una tasa de adopción más modesta. Esto sugiere que en poblaciones relativamente pequeñas como las analizadas en este trabajo, los esfuerzos de comunicación iniciales podrían tener un impacto significativo al impulsar las adopciones iniciales y podrían además determinar en parte el futuro del proceso de difusión.
- Los resultados obtenidos demuestran que incluso en poblaciones relativamente pequeñas, como es el caso de una unidad académica de una IES, la heterogeneidad de los individuos puede ser determinante en el desarrollo de los procesos de difusión de la innovación, y que por lo tanto debe ser un factor para considerar en cualquier esfuerzo que tenga por objeto comprender o intervenir este fenómeno, pues incluso su impacto puede ser amplificado por variaciones situacionales externas.
- Los resultados obtenidos demuestran que para la época en que se desarrolló el proceso de difusión de SAROFI, aun existía en la IES analizada una resistencia de sectores de la población hacia las innovaciones de herramientas para el teletrabajo, y que esta resistencia podía reducirse a través de estímulos que impactan la evaluación que los individuos hacen atributos la de la innovación, como es el caso de su utilidad.

6. Trabajo futuro

El trabajo realizado abre un abanico de posibilidades para desarrollar investigaciones futuras en el campo del uso de la ABM en los fenómenos de difusión de la innovación.

Dada la granularidad de parametrización que permite el modelo construido, éste podría ser fácilmente adaptado para realizar simulaciones de otros fenómenos de difusión diferentes al caso específico de SAROFI, permitiendo de esta forma que nuevas investigaciones se apoyen en el trabajo ya realizado para explorar otros casos de estudio sin tener que abordar completamente el esfuerzo de construir su propio modelo de difusión de la innovación basado en agentes.

El modelo construido también puede ser adoptado para usarse con propósitos de pronóstico (forecasting) de proceso de difusión de la innovación que estén siendo planificados, de modo que no solo pueda ser usado como una herramienta para explorar el eventual impacto de determinadas intervenciones, sino también su pueda evaluar su nivel de exactitud en esta tarea.

La estructura de parámetros, estados y reglas que ha sido desarrollada para el modelo construido puede ser usada como base para el desarrollo de un programa informático que permita de forma amigable a los investigadores construir modelos propios, indicando el número de categorías de individuos que se desean simular, las variables que describen sus cualidades, los estados del proceso de difusión y las reglas de cambio entre ellos.

7. Lecciones aprendidas

Como principales lecciones aprendidas en el desarrollo de este trabajo, se pueden citar las siguientes:

- La construcción de modelos de simulación basados en agentes debe siempre partir necesariamente de un estudio detallado de la descripción del fenómeno a simular que este reportada en la literatura científica, pues esto permite tener bases sólidas para definición de las reglas que dirigirán las simulaciones y permite ahorrar tiempo y esfuerzo en la afinación del modelo.
- Las necesidades de calibración y validación del modelo deben ser tenidas en cuentas desde el momento mismo de su concepción, de modo que se garantice la inclusión de mecanismos adecuados de entrada, salida o intercambio de datos que faciliten esta tarea.
- La modelación basada en agentes permite observar fenómenos emergentes que no son apreciables en análisis aislados, por lo tanto, al realizar simulaciones con este tipo de modelos deben incluirse las graficas o medios de presentación de datos que faciliten al investigador identificar dichos tipos de fenómenos.
- La calidad de los datos que se poseen de los fenómenos que serán simulados a través de modelación basada en agentes es crítica, por lo tanto debe tenerse niveles de certeza muy altos sobre su confiabilidad.

Bibliografía

- Ajzen, I. (1 de 12 de 1991). The Theory of Planned Behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50, 179-211.
- Alexander, P., Moran, D., Rounsevell, M., & Smith, P. (11 de 2013). Modelling the perennial energy crop market: the role of spatial diffusion. *Journal of the Royal Society, Interface*, 10(88), 20130656.
- Alexander, P., Moran, D., Smith, P., Hastings, A., Wang, S., Sünnerberg, G., . . . Cisowska, I. (1 de 3 de 2014). Estimating UK perennial energy crop supply using farm-scale models with spatially disaggregated data. *GCB Bioenergy*, 6(2), 142-155.
- Alkemade, F., & Castaldi, C. (2005). Strategies for the Diffusion of Innovations on Social Networks. *Computational Economics*, 25(1), 3-23.
- Arndt, J. (1967). Role of Product-Related Conversations in the Diffusion of a New Product. *Journal of Marketing Research*, 4(3), 291-295.
- Barabási, A.-L., & Albert, R. (15 de 10 de 1999). Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, 286(5439), 509.
- Bass, F. (1 de 1 de 1969). A New Product Growth for Model Consumer Durables. *Management Science*, 15(5), 215-227.
- Bass, F. (1 de 12 de 2004). A New Product Growth for Model Consumer Durables. *Management Science*, 50, 1825-1832.
- Bemmaor, A. (1992). Modeling the Diffusion of New Durable Goods: Word-of-Mouth Effect Versus Consumer Heterogeneity.
- Benmaor, A. C. (1994). Modeling the diffusion of new durable goods: word-of-mouth effect versus consumer heterogeneity. En Laurent, G., Lilien, G. L., and Pras, B., editors, *Research Traditions in Marketing* (págs. 201-229). Boston, MA.
- Berger, T. (1 de 9 de 2001). Agent-based spatial models applied to agriculture: A simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics*, 25, 245-260.
- Berger, T., Birner, R., McCarthy, N., DÍAz, J., & Wittmer, H. (1 de 1 de 2007). Capturing the complexity of water uses and water users within a multi - Agent framework. *Water Resources Management*, 21, 129-148.
- Brereton, P., Kitchenham, B., Budgen, D., Turner, M., & Khalil, M. (1 de 4 de 2007). Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of Systems and Software*, 80(4), 571-583.
- Briegel, R., Ernst, A., Holzhauser, S., Klemm, D., Krebs, F., & Piñánez, A. (2012). *Social-ecological modelling with LARA: A psychologically well-founded lightweight agent architecture*.

- Broekhuizen, T., Delre, S., & Torres, A. (1 de 3 de 2011). Simulating the Cinema Market: How Cross-Cultural Differences in Social Influence Explain Box Office Distributions. *Journal of Product Innovation Management*, 28(2), 204-217.
- Cadavid, L., & Cardona, C. J. (2015). Impacto de la regla de decisión en el modelado de la difusión de innovaciones. *Production*, (págs. 751-753).
- Carley, K. (28 de 10 de 2011). Validating Computational Models.
- Chansoon, L. (2017). *Variable Importance Measures for Parsimonious Model Selection (Comparison of Tree Models and Bayesian Model Averaging with Application to Prediction of College Graduation)*. Madison: The University of Wisconsin .
- Chatterjee, R., & Eliashberg, J. (9 de 1990). The Innovation Diffusion Process in a Heterogeneous Population: A Micromodeling Approach. *Manage. Sci.*, 36(9), 1057-1079.
- Chica, M., & Rand, W. (1 de 10 de 2017). Building Agent-Based Decision Support Systems for Word-of-Mouth Programs: A Freemium Application. *Journal of Marketing Research*, 54, 752-767.
- Daniels, K., Lamond, D., & Standen, P. (1 de 12 de 2001). Teleworking: Frameworks for Organizational Research. *Journal of Management Studies*, 38, 46-59.
- Davidsson, P. (1 de 1 de 2002). Agent Based Social Simulation: a Computer Science View. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5.
- De Wildt, T. (2015). *Heterogeneity, agent-based modelling and system dynamics - A study about the effects of including adopter heterogeneity in diffusion of innovations models and the consequences on paradigm choice*.
- Deffuant, G., Amblard, F., & Weisbuch, G. (31 de 10 de 2002). How Can Extremism Prevail? a Study Based on the Relative Agreement Interaction Model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(4).
- Deffuant, G., Huet, S., & Amblard, F. (1 de 1 de 2005). An Individual-Based Model of Innovation Diffusion Mixing Social Value and Individual Benefit. *American Journal of Sociology*, 110, 1041-1069.
- Deffuant, G., Huet, S., Bousset, J., Henriot, J., Amon, G., & Weisbuch, G. (1 de 1 de 2002). Agent-based simulation of organic farming conversion in Allier département. *Complexity and Ecosystem Management: The Theory and Practice of Multi-agent Systems*, 158-187.
- Deffuant, G., Neau, D., Amblard, F., & Weisbuch, G. (1 de 1 de 2000). Mixing Beliefs Among Interacting Agents. *Advances in Complex Systems*, 3, 87-98.
- Delre, S., Jager, W., & Janssen, M. (1 de 6 de 2007). Diffusion Dynamics in Small-World Networks with Heterogeneous Consumers. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 13.

- Delre, S., Jager, W., Bijmolt, T., & Janssen, M. (2007). Targeting and timing promotional activities: An agent-based model for the takeoff of new products. *Journal of Business Research*, 60(8), 826-835.
- Delre, S., Jager, W., Bijmolt, T., & Janssen, M. (2010). Will It Spread or Not? The Effects of Social Influences and Network Topology on Innovation Diffusion.
- Dodson, J., & Muller, E. (1978). Models of New Product Diffusion Through Advertising and Word-of-Mouth. *Management Science*, 24(15), 1568-1578.
- Easingwood, C., Mahajan, V., & Muller, E. (1 de 8 de 1983). A Nonuniform Influence Innovation Diffusion Model of New Product Acceptance. *Marketing Science*, 2(3), 273-295.
- Ernst, A., & Briegel, R. (1 de 12 de 2016). A dynamic and spatially explicit psychological model of the diffusion of green electricity across Germany. *Journal of Environmental Psychology*, 52.
- Faber, A., Valente, M., & Janssen, P. (1 de 6 de 2010). Exploring domestic micro-cogeneration in the Netherlands: An agent-based demand model for technology diffusion. *Energy Policy*, 38, 2763-2775.
- Feder, G., & O'Mara, G. (1982). On Information and Innovation Diffusion: A Bayesian Approach. *American Journal of Agricultural Economics*, 64(1), 145-147.
- Fildes, R. (2003). New-Product Diffusion Models: V. Mahajan, E. Muller and Y. Wind (Eds.), Kluwer Academic Press, Boston & Dordrecht, 2000, ISBN 0-7923-7751-6. 115.50 EUR/99.95 USD/70.00 GBP. *International Journal of Forecasting*, 19(2), 327-328.
- Fourt, L., & Woodlock, J. (1960). Early Prediction of Market Success for New Grocery Products. *Journal of Marketing*, 25(2), 31-38.
- France, J., & Ghorbani, A. (2003). *A multiagent system for optimizing urban traffic*.
- Garcia, R., Rummel, P., & Hauser, J. (1 de 2 de 2007). Validating agent-based marketing models through conjoint analysis. *Journal of Business Research*, 60, 848-857.
- Garrett, R., & Danziger, J. (1 de 2 de 2007). Which Telework? Defining and Testing a Taxonomy of Technology-Mediated Work at a Distance. *Social Science Computer Review - SOC SCI COMPUT REV*, 25.
- Goldenberg, J., & Efroni, S. (1 de 11 de 2001). Using cellular automata modeling of the emergence of innovations. *Technological Forecasting and Social Change*, 68, 293-308.
- Griliches, Z. (1957). Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change. *Econometrica*, 25(4), 501-522.
- Haddon, L., & Brynin, M. (1 de 3 de 2005). The Character of Telework and the Characteristics of Teleworkers. *New Technology, Work and Employment*, 20, 34-46.

- Hagerstrand, T. (1967). *Innovation diffusion as a spatial process*. Chicago: University of Chicago Press.
- Hegselmann, R., & Krause, U. (30 de 7 de 2002). Opinion Dynamics and Bounded Confidence Models, Analysis and Simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5.
- Herbert A. Simon: Models of Bounded Rationality. Volume 1: Economic Analysis and Public Policy. Volume 2: Behavioural Economics and Business Organization: 1982 (reprinted 1983), Cambridge, MA: MIT Press. 478, 505 pages. (1 de 7 de 1985). *Organization Studies*, 6(3), 308.
- Hiebert, L. (1974). Risk, Learning, and the Adoption of Fertilizer Responsive Seed Varieties. *American Journal of Agricultural Economics*, 56(4), 764-768.
- HIGGINS, & JP. (2011). Cochrane handbook for systematic reviews of interventions. Version 5.1.0 [updated March 2011]. The Cochrane Collaboration. www.cochrane-handbook.org.
- Holland, J. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Addison Wesley.
- Holtz, G., & Pahl-Wostl, C. (1 de 3 de 2011). Pahl-Wostl, C.: An agent-based model of groundwater over-exploitation in the Upper Guadiana, Spain. *Regional Environmental Change* 12(1), 121. *Regional Environmental Change*, 12, 95-121.
- Jager, W. (2000). Modelling consumer behaviour . s.n. .
- Jager, W., & Janssen, M. (1 de 8 de 2002). Stimulating Diffusion of Green Products. *Journal of Evolutionary Economics*, 12, 283-306.
- Jensen, R. (1982). Adoption and diffusion of an innovation of uncertain profitability. *Journal of Economic Theory*, 27(1), 182-193.
- Jensen, T., Holtz, G., Baedeker, C., & Chappin, E. (2016). Energy-efficiency impacts of an air-quality feedback device in residential buildings: An agent-based modeling assessment. *Energy and Buildings*, 116, 151-163.
- Kalish, S. (1985). A New Product Adoption Model with Price, Advertising, and Uncertainty. *Management Science*, 31(12), 1569-1585.
- Karsai, M., Iniguez, G., Kaski, K., & Kertész, J. (27 de 5 de 2014). Complex contagion process in spreading of online innovation. *Journal of The Royal Society Interface*.
- Karsai, M., Iñiguez, G., Kikas, R., Kaski, K., & Kertész, J. (29 de 1 de 2016). Local cascades induced global contagion: How heterogeneous thresholds, exogenous effects, and unconcerned behaviour govern online adoption spreading. *Scientific Reports*, 6.
- Katz, E., Levin, M., & Hamilton, H. (1963). Traditions of Research on the Diffusion of Innovation. *American Sociological Review*, 28.

- Kaufmann, P., Stagl, S., & Franks, D. (1 de 8 de 2009). Simulating the diffusion of organic farming practices in two New EU Member States. *Ecological Economics*, 68, 2580-2593.
- Kiesling, E. (2011). *Planning the market introduction of new products: An agent-based simulation of innovation diffusion*. Universität Wien.
- Kiesling, E., Günther, M., Stummer, C., & Wakolbinger, L. (2012). Agent-based simulation of innovation diffusion: a review. *Central European Journal of Operations Research*, 20(2), 183-230.
- Knepell, P., & Arangno, D. (1993). *Simulation Validation - a Confidence Assessment Methodology*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society Press.
- Krebs, F., & Ernst, A. (2015). *A spatially explicit agent-based model of the diffusion of green electricity: Model setup and retrodictive validation*.
- Lekvall, P., & Wahlbin, C. (1973). A Study of Some Assumptions Underlying Innovation Diffusion Functions. *The Swedish Journal of Economics*, 75(4), 362-377.
- Mahajan, V., & Muller, E. (1979). Innovation Diffusion and New Product Growth Models in Marketing. *Journal of Marketing*, 43(4), 55-68.
- Mahajan, V., Muller, E., & Bass, F. (1990). New Product Diffusion Models in Marketing: A Review and Directions for Research. *Journal of Marketing*, 54(1), 1-26.
- Mahajan, V., Muller, E., & Bass, F. (1995). Diffusion of New Products: Empirical Generalizations and Managerial Uses. *Marketing Science*, 14(3), G79-G88.
- Mahajan, V., Muller, E., & Kerin, R. (12 de 1984). Introduction Strategy for New Products with Positive and Negative Word-of-Mouth. *Manage. Sci.*, 30(12), 1389-1404.
- Maienhofer, D., & Finholt, T. (2002). Finding Optimal Targets for Change Agents: A Computer Simulation of Innovation Diffusion. *Computational & Mathematical Organization Theory*, 8, 259-280.
- Maier, F. (1 de 12 de 1998). New product diffusion models in innovation management—a system dynamics perspective. *System Dynamics Review*, 14(4), 285-308.
- Mansfield, E. (1961). Technical Change and the Rate of Imitation. *Econometrica*, 29(4), 741-766.
- Matthews, R., Gilbert, N., Roach, A., Polhill, J., & Gotts, N. (2 de 11 de 2007). Agent-Based Land-Use Models: A Review of Applications. *The Centre for Research in Social Simulation*, 22.
- Matthews, R., Polhill, J., Gilbert, N., & Roach, A. (1 de 6 de 2020). Integrating Agent-Based Social Models And Biophysical Models.
- Mccooy, D., & Lyons, S. (1 de 9 de 2014). Consumer preferences and the influence of networks in electric vehicle diffusion: An agent-based microsimulation in Ireland. *Energy Research & Social Science*, 3, 89–101.

- Meade, N., & Islam, T. (2006). Modelling and forecasting the diffusion of innovation - A 25-year review. *International Journal of Forecasting*, 22(3), 519-545.
- Meyer, R., & Sathi, A. (1985). A Multiattribute Model of Consumer Choice during Product Learning. *Marketing Science*, 4(1), 41-61.
- Michalek, J., Papalambros, P., & Skerlos, S. (14 de 2 de 2005). A Study of Fuel Efficiency and Emission Policy Impact on Optimal Vehicle Design Decisions . *Journal of Mechanical Design*, 126(6), 1062-1070.
- Milling, P. (1 de 9 de 1996). Modeling innovation processes for decision support and management simulation. *System Dynamics Review*, 12(3), 211-234.
- Mohandes, N., Sanfilippo, A., & Al Fakhri, M. (2019). Modeling residential adoption of solar energy in the Arabian Gulf Region. *Renewable Energy*, 131, 381-389.
- Moore, G. (1991). *Crossing the chasm : marketing and selling technology products to mainstream customers*. [New York, N.Y.]: HarperBusiness.
- Newman, M. (2000). Models of the Small World. *Journal of Statistical Physics*, 101, 819-841.
- Newman, M., Watts, D., & Strogatz, S. (1 de 3 de 2002). Random Graph Models of Social Networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99 Suppl 1, 2566-2572.
- Oren, S., & Schwartz, R. (1 de 10 de 1988). Diffusion of new products in risk-sensitive markets. *Journal of Forecasting*, 7(4), 273-287.
- Palmer, J., Sorda, G., & Madlener, R. (2015). Modeling the diffusion of residential photovoltaic systems in Italy: An agent-based simulation. *Technological Forecasting and Social Change*, 99(C), 106-131.
- Patrickson, M. (1 de 12 de 2002). Teleworking: Potential employment opportunities for older workers? *International Journal of Manpower*, 23, 704-715.
- Peres, R., Muller, E., & Mahajan, V. (1 de 6 de 2010). Innovation diffusion and new product growth models: A critical review and research directions. *International Journal of Research in Marketing*, 27(2), 91-106.
- Plötz, P., Gnann, T., & Wietschel, M. (1 de 11 de 2014). Modelling market diffusion of electric vehicles with real world driving data — Part I: Model structure and validation. *Ecological Economics*, 107, 411–421.
- Quintero Ramírez, S., & Giraldo Ramírez, D. (2018). El aprendizaje en los sistemas regionales de innovación desde la perspectiva de la modelación basada en agentes.
- Rai, V., & Robinson, S. (31 de 8 de 2015). Agent-based modeling of energy technology adoption: Empirical integration of social, behavioral, economic, and environmental factors. *Environmental Modelling & Software*, 70.

- Rand, W., & Rust, R. (10 de 6 de 2011). Agent-Based Modeling in Marketing: Guidelines for Rigor. *International Journal of Research in Marketing*, 28.
- Resnick, B. (1 de 4 de 2001). Testing a model of exercise behavior in older adults. *Research in Nursing & Health*, 24(2), 83-92.
- Reynolds, S. (1 de 1 de 1987). The cuticle, growth and moulting in insects: The essential background to the action of acylurea insecticides. *Pesticide Science*, 20(2), 131-146.
- Roberts, J., & Urban, G. (2 de 1988). Modeling Multiattribute Utility, Risk, and Belief Dynamics for New Consumer Durable Brand Choice. *Manage. Sci.*, 34(2), 167-185.
- Rogers, E. (1962). *Diffusion of innovations*. New York: Free Press of Glencoe.
- Rogers, E. (1983). *Diffusion of innovations*. New York; London: Free Press ; Collier Macmillan.
- Rogers, E. (2003). *Diffusion of innovations*. New York: Free Press.
- Ryan, B., & Gross, N. (1943). The diffusion of hybrid seed corn in two Iowa communities. *Rural Sociology*, 8(1), 15-24.
- Sargent, R. (2011). Verification and Validation of Simulation Models. *Proceedings of the Winter Simulation Conference* (págs. 183-198). Winter Simulation Conference.
- Sargent, R. (2013). An Introduction to Verification and Validation of Simulation Models. *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World* (págs. 321-327). Piscataway, NJ, USA: IEEE Press.
- Schelling, T. (1 de 7 de 1971). Dynamic models of segregation. *The Journal of Mathematical Sociology*, 1(2), 143-186.
- Schmittlein, D., & Mahajan, V. (1982). Maximum Likelihood Estimation for an Innovation Diffusion Model of New Product Acceptance. *Marketing Science*, 1(1), 57-78.
- Schreinemachers, P., Berger, T., & Aune, J. (1 de 2 de 2007). Simulating soil fertility and poverty dynamics in Uganda: A bio-economic multi-agent systems approach. *Ecological Economics*, 64, 387-401.
- Schreinemachers, P., Berger, T., Sirijinda, A., & Praneetvatakul, S. (1 de 12 de 2009). The Diffusion of Greenhouse Agriculture in Northern Thailand: Combining Econometrics and Agent-Based Modeling. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroéconomie*, 57, 513-536.
- Schreinemachers, P., Potchanasin, C., Berger, T., & Roygrong, S. (1 de 11 de 2010). Agent-based modeling for ex ante assessment of tree crop innovations: litchis in northern Thailand. *Agricultural Economics*, 41(6), 519-536.

- Schwarz, N., & Ernst, A. (1 de 5 de 2009). Ernst, A.: Agent-based modeling of the diffusion of environmental innovations—an empirical approach. *Technol. Forecast. Soc. Change* 76, 497-511. *Technological Forecasting and Social Change*, 76, 497-511.
- Schwoon, M. (1 de 2 de 2006). Simulating the Adoption of Fuel Cell Vehicles. *Journal of Evolutionary Economics*, 16, 435-472.
- Shaikh, N., Rangaswamy, A., & Balakrishnan, A. (1 de 1 de 2006). Modeling the diffusion of innovations using small-world networks. *SSRN Electronic Journal*.
- Sharit, J., Czaja, S., Nair, S., Hoag, D., Leonard, D., & Dilsen, E. (1998). Subjective experiences of stress workload, and bodily discomfort as a function of age and type of computer work.
- Shin, B., Sawy, O., Sheng, O., & Higa, K. (1 de 6 de 2000). Telework: Existing Research and Future Directions. *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce*, 10, 85-101.
- Sorda, G., Sunak, Y., & Madlener, R. (1 de 1 de 2011). A Spatial MAS Simulation to Evaluate the Promotion of Electricity from Agricultural Biogas Plants in Germany. *Ecological Economics*, 89.
- Squazzoni, F. (1 de 1 de 2010). The Impact of Agent-Based Models in the Social Sciences after 15 Years of Incursions,. *History of Economic Ideas*, LVIII.
- Srinivasan, V., & Mason, C. (1986). Nonlinear Least Squares Estimation of New Product Diffusion Models. *Marketing Science*, 5(2), 169-178.
- Stonedahl, F., & Rand, W. (15 de 11 de 2012). When Does Simulated Data Match Real Data? Comparing Model Calibration Functions Using Genetic Algorithms. *SSRN Electronic Journal*.
- Strang, D., & Macy, M. (1 de 7 de 2001). In Search of Excellence: Fads, Success Stories, and Adaptive Emulation. *American Journal of Sociology - AMER J SOCIOL*, 107, 147-182.
- Stummer, C., Kiesling, E., Günther, M., & Vetschera, R. (1 de 3 de 2015). Innovation diffusion of repeat purchase products in a competitive market: An agent-based simulation approach. *European Journal of Operational Research*, 245.
- Sultan, F., Farley, J., & Lehmann, D. (1990). A Meta-Analysis of Applications of Diffusion Models. *Journal of Marketing Research*, 27(1), 70-77.
- Tanny, S., & Derzko, N. (1 de 10 de 1988). Innovators and imitators in innovation diffusion modelling. *Journal of Forecasting*, 7(4), 225-234.
- Tarde, G. (1903). *The laws of imitation*. (E. Parsons, & F. Giddings, Edits.) Oxford, England: Holt.
- Teoría del consumidor*. (s.f.). Obtenido de <http://www.zonaeconomica.com/teoria-del-consumidor>
- Tran, M. (1 de 9 de 2012). Agent-behaviour and network influence on energy innovation diffusion. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 17, 3682–3695.

- Uribe-Gómez, J., & Quintero, S. (15 de 12 de 2017). Aplicación de los modelos de simulación en entornos productivos bajo la metodología de teorías de las restricciones. *Revista CEA*, 3, 11-27.
- Valente, T. (1 de 1 de 2005). Network models and methods for studying the diffusion of innovations. *Models and Methods in Social Network Analysis*, 98-116.
- Valente, T., & Davis, R. (1 de 11 de 1999). Accelerating the diffusion of innovations using opinion leaders. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 566, 55-67.
- Valente, T., & Rogers, E. (1 de 4 de 1995). The Origins and Development of the Diffusion of Innovation Paradigm as an Example of Scientific Growth. *Science communication*, 16, 242-273.
- van den Bulte, C., & Stremersch, S. (2004). Social Contagion and Income Heterogeneity in New Product Diffusion: A Meta-Analytic Test. *Marketing Science*, 23(4), 530-544.
- Venkatesan, R., Krishnan, T., & Kumar, V. (1 de 8 de 2004). Evolutionary Estimation of Macro-Level Diffusion Models Using Genetic Algorithms: An Alternative to Nonlinear Least Squares. *Marketing Science*, 23, 451-464.
- Walker, J. (1969). The Diffusion of Innovations among the American States. *The American Political Science Review*, 63(3), 880-899.
- Wilensky, U. (1999). *Netlogo*. (Center for, & Connected Learning and Computer-Based Modeling, Edits.) Evanstone, IL: Northwestern University.
- Wissler, C. (1915). The Diffusion of Horse Culture among the North American Indians. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1(4), 254-256.
- Zhang, H., & Vorobeychik, Y. (2019). Empirically grounded agent-based models of innovation diffusion: a critical review. *Artificial Intelligence Review*, 52(1), 707-741.
- Zhang, H., Vorobeychik, Y., Letchford, J., & Lakkaraju, K. (25 de 1 de 2016). Data-driven agent-based modeling, with application to rooftop solar adoption. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*.
- Zhao, J., Mazhari, E., Celik, N., & Son, Y.-J. (1 de 11 de 2011). Hybrid simulation-based policy evaluation for solar power generation systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19, 2189-2205.

ANEXO A - código fuente del modelo computacional

Globals

[

;;

;; VARIABLES GLOBALES DEFINIDAS MENDIANTE CONTROLES DESLIZADORES

;;pcid porcentaje de directivos que conocen de SAROFI en su lanzamiento

;;pcia porcentaje de profesores asociados que conocen de SAROFI en su lanzamiento

;;pcio porcentaje de profesores ocasionales que conocen de SAROFI en su lanzamiento

;;pcin porcentaje de empleados no docentes que conocen SAROFI desde su lanzamiento

;;p_dir_conocimiento parámetro de influencia externa para los directivos en el estado de conocimiento

;;p_aso_conocimiento parámetro de influencia externa para los profesores asociados en el estado de conocimiento

;;p_oca_conocimiento parámetro de influencia externa para los profesores ocasionales en el estado de conocimiento

;;p_ndocente parámetro de influencia externa para los empleados no docentes en todo el proceso de adopcion, estos no transitan entre estados

;;p_dir_decision parámetro de influencia externa para los directivos en el estado de decisión

;;p_aso_decision parámetro de influencia externa para los profesores asociados en el estado de decisión

;;p_oca_decision parámetro de influencia externa para los profesores ocasionales en el estado de decisión

```

..*****
,,
*****

```

;; cordenadas de los patch donde se ubicaran los grupos de individuos, según grupo y estado

x_directivo

x_asociado

x_ocasional

x_nodocente

y_desconocimiento

y_conocimiento

y_persuacion

y_decision

nro_tipos_individuos ;; Es el numero de tipos de individuos se usa para hacer la distribucion en los patches

nro_estados ;; numero de estados del proceso de adopcion que se representan en el modelo

total_general_adoptantes ;; acumulador del numero total de adoptantes sin importar el tipo

p_oca_conocimeinto_ori

p_oca_decision_ori

p_nod_conocimiento_ori

p_nod_decision_ori

]

;; Definición de los tipos de agentes (razas de tortugas)

breed [directivos directivo]

breed [asociados asociado]

breed [ocasionales ocasional]

breed [nodocentes nodocente]

breed [entornos entorno]

directivos-own

[

estado ;; numero 0, 1, 2, 3 que representa el estado del proceso de adopcion 0=desconocimiento, 1=conocimiento, 2=persuación, 3=decisión-implementación

q ;; parametro de influeincia interna

edad ;; identificar en al escala de rangos de edad 1 = joven, 2 = maduro o 3 = mayor

trabajo_TIC ;; valor de 0 a 1 indica la porción de su trabajo que se apoya en en las TIC, también se considera un indicador de la habilidad en las TIC()

peso_edad ;; valor entre 0 y 1 que indica que tanto pesa la edad para el invidiuo a la hora de evaluar la adopcion de la innovacion

peso_TIC ;; valor entre 0 y 1 que indica que tanto pesa la habilida_TIC para el invidiuo a la hora de evaluar la adopcion de la innovacion

umbral_complejidad ;; valor a partir del cual se adopta la innovacion si la evaluacion alcanza este umbral

decidio_adoptar? ;; verdadero o false se cambiar en el estado de persuacion segun al evaluacion de los atributos de la innovacio

]

asociados-own

[

estado ;; numero 0, 1, 2, 3 que representa el estado del proceso de adopcion 0=desconocimiento, 1=conocimiento, 2=persuación, 3=decisión-implementación

q ;; parametro de influeincia interna

edad ;; identificar en al escala de rangos de edad 1 = joven, 2 = maduro o 3 = mayor

trabajo_TIC ;; valor de 0 a 1 indica la porción de su trabajo que se apoya en en las TIC

peso_edad ;; valor entre 0 y 1 que indica que tanto pesa la edad para el invididuo a la hora de evaluar la adopcion de la innovacion

peso_TIC ;; valor entre 0 y 1 que indica que tanto pesa la habilida_TIC para el invididuo a la hora de evaluar la adopcion de la innovacion

umbral_complejidad ;; valor a partir del cual se adopta la innovacion si la evaluacion alcanza este umbral

decidio_adoptar? ;; verdadero o false se cambiar en el estado de persuacion segun al evaluacion de los atributos de la innovacio

]

ocasionales-own

[

estado ;; numero 0, 1, 2, 3 que representa el estado del proceso de adopcion 0=desconocimiento, 1=conocimiento, 2=persuación, 3=decisión-implementación

q ;; parametro de influeincia interna

edad ;; identificar en al escala de rangos de edad 1 = joven, 2 = maduro o 3 = mayor

trabajo_TIC ;; valor de 0 a 1 indica la porción de su trabajo que se apoya en en las TIC

peso_edad ;; valor entre 0 y 1 que indica que tanto pesa la edad para el invididuo a la hora de evaluar la adopcion de la innovacion

peso_TIC ;; valor entre 0 y 1 que indica que tanto pesa la habilida_TIC para el invididuo a la hora de evaluar la adopcion de la innovacion

umbral_complejidad ;; valor a partir del cual se adopta la innovacion si la evaluacion alcanza este umbral

decidio_adoptar? ;; verdadero o false se cambiar en el estado de persuacion segun al evaluacion de los atributos de la innovacio

]

nodocentes-own

[

estado ;; numero 0, 1, 2, 3 que representa el estado del proceso de adopcion 0=desconocimiento, 1=conocimiento, 2=persuación, 3=decisión-implementación

```

q ;; parametro de influencia externa
]

to setup
  clear-all

  set nro_tipos_individuos 4
  set nro_estados 4

  ;; calcula de las coordenadas donde se pondrán las etiquetas de los nombres de los grupos
  let y_grupos (-1 * max-pycor + 1)
  let x_grupos (-1 * max-pxcor + 10)
  let paso_x (2 * max-pxcor - 8) / nro_estados

  ;; asignación de las etiquetas de los nombres de los grupos
  ask patch (x_grupos + 0 * paso_x) y_grupos [set plabel "Directivos"]
  ask patch (x_grupos + 1 * paso_x) y_grupos [set plabel "Asociados"]
  ask patch (x_grupos + 2 * paso_x) y_grupos [set plabel "Ocasionales"]
  ask patch (x_grupos + 3 * paso_x) y_grupos [set plabel "NoDocentes"]

  set x_directivo (x_grupos + 0 * paso_x)
  set x_asociado (x_grupos + 1 * paso_x)
  set x_ocasional (x_grupos + 2 * paso_x)
  set x_nodocente (x_grupos + 3 * paso_x)

  ;; calculo de las coordenadas donde se pondran las etiquetas de los estados
  let x_estados (-1 * max-pxcor + 5)
  let y_estados (y_grupos + 4)
  let paso_y (2 * max-pycor - 2) / nro_estados

```

```

ask patch x_estados (y_estados + 0 * paso_y) [set plabel "Desconocimiento"]
ask patch x_estados (y_estados + 1 * paso_y) [set plabel "Conocimiento "]
ask patch x_estados (y_estados + 2 * paso_y) [set plabel "Persuasión "]
ask patch x_estados (y_estados + 3 * paso_y) [set plabel "Decisión "]

```

```

set y_desconocimiento (y_estados + 0 * paso_y)
set y_conocimiento (y_estados + 1 * paso_y)
set y_persuacion (y_estados + 2 * paso_y)
set y_decision (y_estados + 3 * paso_y)

```

;; ahora se inicia la creación y ubicación de agentes

```

set-default-shape directivos "person"
create-directivos nro_directivos [
  set heading 0
  set color yellow
  set q (generar_q_normal media_q_dir d_std_q_dir)
  set edad generar_edad 45 8
  set trabajo_TIC (random-normal media_tic_dir d_std_tic_dir)
  set peso_edad 0.5
  set peso_TIC 0.5
  set umbral_complejidad ubrl_aprobacion_dir
  set decidio_adoptar? false
  ifelse (random 100) < (pcid * 100)
  [
    set estado 1
    setxy x_directivo y_conocimiento
  ]
]

```

```

[
  set estado 0
  setxy x_directivo y_desconocimiento
]
]

```

```

set-default-shape asociados "person"
create-asociados nro_asociados [
  set heading 0
  set color blue
  set q (generar_q_normal media_q_aso d_std_q_aso)
  set edad generar_edad 57 10
  set trabajo_TIC (random-normal media_tic_aso d_std_tic_aso)
  set peso_edad 0.7
  set peso_TIC 0.3
  set umbral_complejidad ubrl_aprobacion_aso
  set decidio_adoptar? false
  ifelse (random 100) < (pcia * 100)
  [
    set estado 1
    setxy x_asociado y_conocimiento
  ]
  [
    set estado 0
    setxy x_asociado y_desconocimiento
  ]
]
]

```

```

set-default-shape ocasionales "person"
create-ocasionales nro_ocasionales [
  set heading 0
  set color orange
  set q (generar_q_normal media_q_oca d_std_q_oca)
  set edad generar_edad 32 6
  set trabajo_TIC (random-normal media_tic_oca d_std_tic_oca)
  set peso_edad 0.6
  set peso_TIC 0.4
  set umbral_complejidad ubrl_aprobacion_oca
  set decidio_adoptar? false
  ifelse (random 100) < (pcio * 100)
    [
      set estado 1
      setxy x_ocasional y_conocimiento
    ]
    [
      set estado 0
      setxy x_ocasional y_desconocimiento
    ]
  ]
]

```

```

set-default-shape nodocentes "person"
create-nodocentes nro_nodocentes [
  set heading 0
  set color lime
  set q (generar_q_normal media_q_nod d_std_q_nod)
  ifelse (random 100) < (pcin * 100)

```

```

[
  set estado 1
  setxy x_nodocente y_conocimiento
]
[
  set estado 0
  setxy x_nodocente y_desconocimiento
]
]

```

```

set-default-shape entornos "house"
create-entornos 1 [
  set heading 0
  set color green
  let y_entorno (-1 * max-pycor + 3)
  let x_entorno (-1 * max-pxcor + 2)
  setxy x_entorno (y_entorno - 1)
  ask patch (x_entorno + 1) (y_entorno - 2) [set plabel "Campus" ]
]

```

```

actualizar_etiquetas_conteo

```

```

set p_oca_conocimiento_ori p_oca_conocimiento
set p_oca_decision_ori p_oca_decision
set p_nod_conocimiento_ori p_nod_conocimiento
set p_nod_decision_ori p_nod_decision

```

```

reset-ticks

```

end

;;to go_once

;; ask directivos [actualizar_estado_directivos]

;; ask asociados [actualizar_estado_asociados]

;; ask ocasionales [actualizar_estado_ocasionales]

;; ask nodocentes [actualizar_estado_nodocentes]

;; actualizar_etiquetas_conteo

;; tick

;;end

to go

if (all? directivos [estado = 3]) and (all? asociados [estado = 3]) and (all? ocasionales [estado = 3])
and (all? nodocentes [estado = 3])

[stop]

ask directivos [actualizar_estado_directivos]

ask asociados [actualizar_estado_asociados]

ask ocasionales [actualizar_estado_ocasionales]

ask nodocentes [actualizar_estado_nodocentes]

ask entornos [actualizar_estado_entorno]

actualizar_etiquetas_conteo

tick

end

to actualizar_etiquetas_conteo

ask patch x_directivo (y_desconocimiento - 2) [set plabel count directivos with [estado = 0]]

ask patch x_directivo (y_conocimiento - 2) [set plabel count directivos with [estado = 1]]

ask patch x_directivo (y_persuacion - 2) [set plabel count directivos with [estado = 2]]

ask patch x_directivo (y_decision - 2) [set plabel count directivos with [estado = 3]]

ask patch x_asociado (y_desconocimiento - 2) [set plabel count asociados with [estado = 0]]

ask patch x_asociado (y_conocimiento - 2) [set plabel count asociados with [estado = 1]]

ask patch x_asociado (y_persuacion - 2) [set plabel count asociados with [estado = 2]]

ask patch x_asociado (y_decision - 2) [set plabel count asociados with [estado = 3]]

ask patch x_ocasional (y_desconocimiento - 2) [set plabel count ocasionales with [estado = 0]]

ask patch x_ocasional (y_conocimiento - 2) [set plabel count ocasionales with [estado = 1]]

ask patch x_ocasional (y_persuacion - 2) [set plabel count ocasionales with [estado = 2]]

ask patch x_ocasional (y_decision - 2) [set plabel count ocasionales with [estado = 3]]

ask patch x_nodocente (y_desconocimiento - 2) [set plabel count nodocentes with [estado = 0]]

ask patch x_nodocente (y_conocimiento - 2) [set plabel count nodocentes with [estado = 1]]

ask patch x_nodocente (y_persuacion - 2) [set plabel count nodocentes with [estado = 2]]

ask patch x_nodocente (y_decision - 2) [set plabel count nodocentes with [estado = 3]]

end

to-report generar_edad [media desviacion]

let edad_generada random-normal media desviacion

if edad_generada <= 35

[report 1]

if edad_generada > 35 and edad_generada <= 50

```

    [report 2]
  if edad_generada > 50
    [report 3]
  end
end

```

```

to-report generar_q_normal [media desviacion]
  let q_generada (random-normal media desviacion)
  ifelse q_generada < 0
    [report 0]
  [
    ifelse q_generada > 1
      [report 1]
      [report q_generada]
    ]
  end
end

```

;; procedimiento de actualizacion de estado para directivos

```

to actualizar_estado_directivos
  if estado = 2
    [
      ifelse decidio_adoptar?
        [
          set estado 3
          setxy x_directivo y_decision
        ]
        [
          let nro_directivos_adoptaron (count directivos with [estado = 3])

```

```

    let probabilidad_de_adoptar ( p_dir_decision + q * (nro_directivos_adoptaron /
nro_directivos) )
    if random 100 < (probabilidad_de_adoptar * 100)
    [
    set estado 3
    setxy x_directivo y_decision
    ]
  ]
]

```

```

if estado = 1

```

```

[
let complejidad ( ((3 - edad) / 2) * peso_edad + trabajo_TIC * peso_TIC )
if complejidad > umbral_complejidad
[set decidio_adoptar? true]
set estado 2
setxy x_directivo y_persuacion
]

```

```

if estado = 0

```

```

[
let nro_directivos_conocen (count directivos with [estado = 1])
let probabilidad_de_conocer ( p_dir_conocimiento + q * (nro_directivos_conocen /
nro_directivos) )
if random 100 < (probabilidad_de_conocer * 100)
[
set estado 1
setxy x_directivo y_conocimiento
]
]

```

```

    ]
  ]
end

```

```
;; procedimiento de actualizacion de estado para asociados
```

```
to actualizar_estado_asociados
```

```
  if estado = 2
```

```
    [
```

```
      ifelse decidio_adoptar?
```

```
        [
```

```
          set estado 3
```

```
          setxy x_asociado y_decision
```

```
        ]
```

```
        [
```

```
          let nro_asociados_adoptaron (count asociados with [estado = 3])
```

```
          let probabilidad_de_adoptar ( p_aso_decision + q * (nro_asociados_adoptaron /
nro_asociados) )
```

```
          if random 100 < (probabilidad_de_adoptar * 100)
```

```
            [
```

```
              set estado 3
```

```
              setxy x_asociado y_decision
```

```
            ]
```

```
          ]
```

```
    ]
```

```
  if estado = 1
```

```
    [
```

```
      let complejidad ( ((3 - edad) / 2) * peso_edad + trabajo_TIC * peso_TIC )
```

```

if complejidad > umbral_complejidad
  [set decido_adoptar? true]
set estado 2
setxy x_asociado y_persuacion
]

if estado = 0
  [
    let nro_asociados_conocen (count asociados with [estado = 1])
    let probabilidad_de_conocer ( p_aso_conocimiento + q * (nro_asociados_conocen /
nro_asociados) )
    if random 100 < (probabilidad_de_conocer * 100)
      [
        set estado 1
        setxy x_asociado y_conocimiento
      ]
    ]
end

;; procedimiento de actualizacion de estado para ocasionales
to actualizar_estado_ocasionales
  if estado = 2
    [
      ifelse decido_adoptar?
        [
          set estado 3
          setxy x_ocasional y_decision
        ]
    ]
  ]
end

```

```

]
[
  let nro_ocasionales_adoptaron (count ocasionales with [estado = 3])

  let probabilidad_de_adoptar ( p_oca_decision + q * (nro_ocasionales_adoptaron /
nro_ocasionales) )

  if random 100 < (probabilidad_de_adoptar * 100)
  [
    set estado 3
    setxy x_ocasional y_decision
  ]
]
]

if estado = 1
[
  let complejidad ( ((3 - edad) / 2) * peso_edad + trabajo_TIC * peso_TIC )
  if complejidad > umbral_complejidad
  [set decidio_adoptar? true]
  set estado 2
  setxy x_ocasional y_persuacion
]

if estado = 0
[
  let nro_ocasionales_conocen (count ocasionales with [estado = 1])

  let probabilidad_de_conocer ( p_oca_conocimiento + q * (nro_ocasionales_conocen /
nro_ocasionales) )

  if random 100 < (probabilidad_de_conocer * 100)

```

```

[
  set estado 1
  setxy x_ocasional y_conocimiento
]
]
end

;; procedimiento de actualización de estado para nodocentes
to actualizar_estado_nodocentes
  if estado = 1
  [
    let nro_nodocentes_adoptaron (count nodocentes with [estado = 3])
    let probabilidad_de_adoptar ( p_nod_decision + q * (nro_nodocentes_adoptaron /
nro_nodocentes) )
    if random 100 < (probabilidad_de_adoptar * 100)
    [
      set estado 3
      setxy x_nodocente y_decision
    ]
  ]

  if estado = 0
  [
    let nro_nodocentes_conocieron (count nodocentes with [estado = 1])
    let probabilidad_de_conocer ( p_nod_conocimiento + q * (nro_nodocentes_conocieron /
nro_nodocentes) )
    if random 100 < (probabilidad_de_conocer * 100)
    [

```

```

    set estado 1
    setxy x_nodocente y_conocimiento
  ]
]
end

;; procedimiento de actualizacion del agente entorno
to actualizar_estado_entorno

set p_oca_conocimiento p_oca_conocimeinto_ori
set p_oca_decision p_oca_decision_ori
set p_nod_conocimiento p_nod_conocimiento_ori
set p_nod_decision p_nod_decision_ori
ask entornos [set color green]

if (ticks >= 16) and (ticks <= 19)
[
  set p_nod_conocimiento (p_nod_conocimiento_ori * 2.30)
  set p_nod_decision (p_nod_decision_ori * 2.30)
  ask entornos [set color yellow]
]

if (ticks >= 20) and (ticks <= 40)
[
  set p_oca_conocimiento (p_oca_conocimeinto_ori * 2.80)
  set p_oca_decision (p_oca_decision_ori * 2.80)
  ask entornos [set color yellow]
]

```

end