



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES  
DEPARTAMENTO DE ANTROPOLOGÍA  
MAGÍSTER EN ANÁLISIS SISTÉMICO  
APLICADO A LA SOCIEDAD



# **DIVERSIDAD CULTURAL Y PROBABILIDAD DIFERENCIADA DE INTERACCIÓN COMUNICATIVA**

## **Un modelo basado en agentes**

Tesis conducente al grado de  
Magíster en Análisis Sistemico Aplicado a la Sociedad.

ALUMNO: CHRISTIAN BLANCO JAKSIC  
PROFESOR GUÍA: PABLO RAZETO BARRY

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MANUEL VIVANCO ARANCIBIA  
HUGO CADENAS RAMOS

SANTIAGO, 19 DE DICIEMBRE DE 2011

## **AGRADECIMIENTOS**

La realización de la presente tesis, más allá del esfuerzo personal, requirió la participación de varias personas que –directa o indirectamente– hicieron un aporte sustantivo de apoyo, orientación, guía y opinión, sin los cuales nada de lo que sigue hubiera sido posible.

Quisiera agradecer al Instituto de Filosofía y Ciencias de la Complejidad (IFICC) por haber ofrecido esta posibilidad de investigación. En especial a su director Pablo Razeto, por su dedicada labor como profesor guía de la investigación. También a Juan Razeto, quien trabajó largas horas para programar el modelo. Asimismo, agradezco a Nelson Paulus, Francisco Meneses, Manuel Vivanco y a los otros miembros del Grupo de Modelamiento en Ciencias Sociales del IFICC por sus importantes contribuciones en las reuniones quincenales.

Agradezco especialmente la colaboración del cuerpo académico y de la coordinación del Magíster en Análisis Sistémico Aplicado a la Sociedad, que junto con proveerme las herramientas teóricas y analíticas durante estos años, además me otorgó posibilidad de cursar el programa con ayuda financiera, lo que fue decisivo para permitirme iniciar mis estudios y culminar con esta investigación.

También quiero agradecer el apoyo, el cariño y la paciencia de Priscila Cabrera, que se encargó personalmente –y día tras día– de que yo estuviera en las mejores condiciones para desarrollar esta tesis.

A ellos y a muchos otros, muchas gracias.

## **RESUMEN**

### RESUMEN

El problema de la evolución del orden social ha sido vinculado con la probabilidad de interacción en la teoría social (Luhmann, 2007). La relación entre la probabilidad de interacción y la evolución sociocultural puede ser estudiada analizando el fenómeno del patrón latitudinal de diversidad cultural, según el cual la mayor heterogeneidad cultural se concentra en las zonas tropicales (Collard y Foley, 2002). Las diversas explicaciones teóricas del patrón recurren a la reducción de la probabilidad de interacción por factores ecológicos como mecanismo explicativo (Nettle, 2009). Por medio de la introducción de probabilidad diferenciada de interacción comunicativa en el modelo de diseminación cultural basado en agentes de Axelrod (1997), se concluye que la diversidad cultural es explicada por la probabilidad diferenciada de interacción comunicativa. Los resultados del modelo muestran comportamientos emergentes impredecibles, típicos de los sistemas complejos: la relación entre la importancia del factor ecológico y el gradiente latitudinal de diversidad cultural es no lineal, presenta dos transiciones de fase y genera tres zonas de sensibilidad (neutra, negativa y positiva) según el incremento de la importancia del factor ecológico en la probabilidad de interacción.

### **Palabras Clave**

Modelo basado en agentes, diversidad cultural, interacción, comunicación

## ABSTRACT

The problem of social order is closely related to the probability of interaction in Luhmann's social theory (2007). The relationship between the probability of interaction and the socio-cultural evolution can be studied by analyzing the latitudinal pattern of cultural diversity, in which higher levels of cultural heterogeneity is concentrated in tropical regions (Collard & Foley, 2002). Theoretical explanations of this pattern are based on the reduction of the probability of interaction produced by ecological factor as their explanatory mechanism (Nettle, 2009). By means of the introduction of a differentiated probability of interaction on Axelrod's agent-based cultural dissemination model (1997) we conclude that cultural diversity is explained by the differences in the probability of communicative interaction. The results of the model show unpredictable emergent behavior, typically found on complex systems: there is a non-linear relationship between the importance of the ecological factor and the latitudinal gradient of cultural diversity, it has two phase transitions, generating three different sensibility areas (neutral, negative and positive) according to the increase of the importance of the ecological factor in the probability of interaction.

### **Keywords**

Agent-based modelling, cultural diversity, interaction, communication

## CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS .....	1
RESUMEN .....	2
CONTENIDOS .....	4
GRÁFICOS, TABLAS Y FIGURAS .....	6
Índice de gráficos.....	6
Índice de tablas .....	7
Índice de figuras .....	7
1 INTRODUCCIÓN .....	10
1.1 Motivación y relevancia .....	12
2 MARCO DE ANTECEDENTES .....	17
2.1 El patrón geográfico de diversidad cultural.....	19
3 MARCO TEÓRICO.....	24
3.1 Una teoría de la evolución cultural y un concepto operativo de cultura .....	24
3.2 Ecología cultural, psicología evolucionista y teoría de sistemas sociales .....	28
3.3 Evolución sociocultural más allá del determinismo ecológico o social .....	31
3.4 Teoría de la complejidad y modelamiento en las ciencias sociales .....	37
3.4.1 Los autómatas celulares elementales de Wolfram .....	40
3.4.2 El juego de la vida de Conway .....	44
3.5 Ciencia social generativa .....	48
3.6 Modelos clásicos en ciencias sociales .....	49
3.6.1 El modelo de segregación de Schelling.....	50
3.6.2 El modelo Sugarscape .....	52
3.7 El modelo de diseminación cultural de Axelrod .....	56
3.7.1 Una re-lectura luhmanniana del modelo de Axelrod.....	56

3.7.2	Los fundamentos del modelo de diseminación de Axelrod .....	57
4	OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	64
4.1	Objetivo general.....	64
4.2	Objetivos específicos .....	64
4.3	Hipótesis general .....	65
4.4	Hipótesis específicas .....	65
5	METODOLOGÍA .....	66
5.1	Paradigma epistemológico .....	67
5.2	Tipo de estudio .....	69
5.3	Técnicas de Investigación.....	70
5.4	Limitaciones de la investigación.....	72
5.4.1	Limitaciones de los modelos basados en agentes.....	73
5.4.2	Limitaciones de la presente investigación .....	74
6	EL MODELO DE PROBABILIDAD DIFERENCIADA DE INTERACCIÓN.....	76
6.1	La versión del modelo prediseñado de Axelrod en Netlogo.....	76
6.2	Elementos del modelo de probabilidad diferenciada de interacción .....	77
6.2.1	Ambiente.....	78
6.2.2	Agentes.....	81
6.2.3	Reglas.....	82
6.3	Resultados del modelo.....	84
6.3.1	Variables de resultado .....	84
6.3.2	Condiciones de estabilización del modelo.....	86
6.4	Comparación entre ambos modelos.....	87
6.5	Operatoria del modelo y pseudo-programación.....	88
7	PROGRAMACIÓN DEL MODELO PARA LA SIMULACIÓN .....	89
7.1	El programa Netlogo 4.1.3 .....	89
7.2	Controles del modelo .....	91

7.3	Visualizadores de resultados.....	94
8	DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	97
8.1	Experimento principal: variaciones en el peso del factor ecológico .....	97
8.2	Experimentos proyectados.....	99
9	RESULTADOS.....	100
9.1	Resultados de una simulación tipo del modelo.....	100
9.2	Resultados de variaciones de Alpha en variables secundarias .....	107
9.3	Resultados de Beta según probabilidad diferenciada de interacción .....	109
10	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	113
	BIBLIOGRAFÍA .....	118
	ANEXOS .....	124

## GRÁFICOS, TABLAS Y FIGURAS

### Índice de gráficos

Gráfico 1	– Densidad (diversidad) cultural por latitud (Collard y Foley, 2002).....	19
Gráfico 2	– Mapa de calor de la diversidad etnolingüística en Europa, Asia y África (Currie y Mace, 2009) .....	20
Gráfico 3	– Mapa del patrón geográfico mundial de diversidad cultural (Collard y Foley, 2002).....	20
Gráfico 4	– Patrón global de densidad lingüística (Nettle, 2009).....	21
Gráfico 5	– Valores de Alpha ordenados correlativamente utilizados en el experimento ..	97
Gráfico 6	– Histogramas del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 0 y 50 mil .....	101
Gráfico 7	– Histogramas del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 100 mil y 250 mil .....	103
Gráfico 8	– Histogramas del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 300 mil y 350 mil .....	104
Gráfico 9	– Histogramas del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 400 mil y 400.631.....	105

Gráfico 10 – Evolución del número de zonas culturales y el tamaño máximo de la cultura mayor en 400 mil unidades de tiempo graficadas cada 1000 iteraciones .....	106
Gráfico 11 – Promedio de número de zonas culturales y tamaño promedio de cultura en 10 iteraciones según variaciones de Alpha .....	107
Gráfico 12 – Promedio de tiempo para la estabilización del modelo en 10 iteraciones según variaciones de Alpha .....	108
Gráfico 13 – Variaciones de Beta Promedio en 10 iteraciones según valores crecientes de de Alpha (normalizado) .....	110
Gráfico 14 – Variaciones de Beta Promedio en 10 iteraciones según valores crecientes de de Alpha (sin normalizar).....	111
Gráfico 15 – Promedio de tiempo para la estabilización del modelo y valores de Beta en 10 iteraciones según variaciones de Alpha .....	112

### Índice de tablas

Tabla 1 – Clases de comportamiento de los autómatas celulares elementales .....	42
Tabla 2 – Reglas del juego de la vida.....	46
Tabla 3 – Ejemplo de condición inicial del modelo de diseminación cultural en grilla 10x10, 5 dimensiones y 10 rasgos.....	59
Tabla 4 – Elementos del ambiente en el modelo de probabilidad diferenciada de interacción.....	80
Tabla 5 – Elementos de los agentes en el modelo de probabilidad diferenciada de interacción.....	81
Tabla 6 – Variables de resultado del modelo de probabilidad diferenciada de interacción	85
Tabla 7 – Comparación de las versiones estándar del modelo de Axelrod y del Modelo de Probabilidad Diferenciada de Interacción .....	87
Tabla 8 – Pseudo-programación del modelo de probabilidad diferenciada de interacción	88

### Índice de figuras

Figura 1 – Proceso de evolución socio-cultural (Blanco et al. 2010).....	25
Figura 2 - Regla 110 de autómatas celulares elementales .....	42
Figura 3 – Regla 30 de autómatas celulares elementales .....	43
Figura 4 – Cono geógrafo ( <i>Conus textile</i> ) con patrones de la regla 30 de autómatas celulares.....	43

Figura 5 – Representación de un torus o toroide (imagen: Wikipedia.org).....	45
Figura 6 – Vecindad de Von Neumann (izquierda) y Vecindad de Moore (derecha) (Imágenes: Wikibooks.org).....	45
Figura 7 – Evolución del R Pentomino en el Juego de la Vida en tiempos 0 y 100 (Netlogo) .....	47
Figura 8 – Evolución del R Pentomino en el Juego de la Vida en tiempos 600 y 1500 (Netlogo) .....	47
Figura 9 – Evolución de la segregación residencial en el modelo de Schelling (Netlogo) .	51
Figura 10 – El modelo Sugarscape en funcionamiento (Netlogo) .....	54
Figura 11 – Evolución del modelo de diseminación cultural de Axelrod (1997) en momentos cada 20.000 iteraciones.....	61
Figura 12 – Ejemplo de instrucciones de Logo para generar un cuadrado con la tortuga (Imagen: Logo Foundation) .....	89
Figura 13 – Visualización de Netlogo 4.3.1 .....	90
Figura 14 – Botones básicos del modelo de probabilidad diferenciada de interacción.....	91
Figura 15 – Botón de actualización de visualizaciones del modelo de probabilidad diferenciada de interacción.....	92
Figura 16 – Deslizadores de complejidad cultural y peso relativo del factor ecológico del modelo de probabilidad diferenciada de interacción .....	92
Figura 17 – Deslizadores de velocidad del modelo y de intervalo de muestra del modelo de probabilidad diferenciada de interacción .....	93
Figura 18 – Interruptores de visualización de gráficos del modelo de probabilidad diferenciada de interacción.....	93
Figura 19 – Control de número máximo de iteraciones del modelo de probabilidad diferenciada de interacción.....	93
Figura 20 –Visualizador numérico del valor de Beta y contados de estabilidad del modelo de probabilidad diferenciada de interacción .....	94
Figura 21 – Visualizador de la grilla del modelo de probabilidad diferenciada de interacción .....	95
Figura 22 – Visualizador de la histograma de diversidad cultural según latitud del modelo de probabilidad diferenciada de interacción .....	95
Figura 23 – Visualizador del número de zonas culturales y del tamaño de la mayor zona cultural del modelo de probabilidad diferenciada de interacción.....	96

Figura 24 – Evolución del modelo de de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 0 y 50 mil .....	100
Figura 25 – Evolución del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 100 mil y 250 mil.....	102
Figura 26 – Evolución del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 300 mil y 350 mil.....	104
Figura 27 – Evolución del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 400 mil y 400.631.....	105

## 1 INTRODUCCIÓN

La presente investigación intenta dar respuesta a la pregunta por la probabilidad diferenciada de interacción comunicativa, en el entendido de que la sociedad constituye un sistema complejo evolutivo y auto-organizado. Por ello, su análisis requiere una perspectiva epistemológica (Ciencia Generativa), teórica (sociología de Luhmann y Psicología Evolucionista) y metodológica (Modelamiento basado en Agentes) que permita dar cuenta de esta complejidad.

Por otra parte, se requiere identificar un fenómeno social donde la probabilidad diferenciada de interacción sea el mecanismo principal para la generación de una cierta forma de orden social, proveyendo así de un objeto apropiado para la investigación empírica. Se reconoce, entonces, en el patrón geográfico latitudinal de distribución de la diversidad cultural –descrito por Collard y Foley (2002)– un fenómeno social suficientemente robusto como para servir de escenario para la experimentación computacional y la simulación por medio de la técnica del modelamiento basado en agentes. El patrón encuentra altas correlaciones de carácter negativo entre la latitud y la diversidad cultural, lo que indica que las culturas son más compactas, numerosas y diversas en la zona tropical, mientras que se hacen más extensas y homogéneas a medida que se avanza hacia los polos. Las explicaciones de los ecólogos culturales son diversas y atribuyen estas diferencias a la mayor concentración de patógenos en las zonas más templadas y húmedas, a la menor productividad primaria de las zonas polares que incentivan el comercio o a las diferencias en complejidad política y sus efectos en la extensión territorial de las culturas (Collard y Foley, 2002; Nettle, 2009; Currie y Mace, 2009). Independiente de cuál resulte la explicación empírica más plausible, todas tienen en común la importancia de la probabilidad diferenciada de interacción.

En términos metodológicos, el modelo de Axelrod (1997) de diseminación cultural –que no involucra probabilidad diferenciada de interacción de carácter ecológico– provee una plataforma sobre la cual es posible introducir tal condición para su simulación. Bajo estas condiciones, la presente investigación tiene como objetivo

indagar por medio de un modelo basado en agentes los efectos de la probabilidad diferenciada de interacción en la evolución sociocultural. En la medida que el modelo pueda reproducir el patrón latitudinal de diversidad con la introducción de un factor ecológico que indisponga a la interacción, se verificará la tesis respecto de la influencia de la probabilidad diferenciada de interacción en la generación de zonas de mayor o menor diversidad cultural.

Para las ciencias sociales contemporáneas la pregunta por la interacción comunicativa resulta central, en la medida que es un elemento clave para la explicación de la emergencia, estabilización, consolidación e incluso para los cambios en el orden social (Hechter y Horne, 2003). Desde la perspectiva evolutiva de la sociología de Luhmann, por su parte, la resolución de la denominada “paradoja de la probabilidad de lo improbable” depende en gran medida de cómo se aborde el problema de la probabilidad de interacción en los sistemas sociales y de cómo éste pueda ser formalizado para abrir espacios para la investigación empírica de sistemas sociales complejos (Razeto-Barry y Cienfuegos-Illanes, 2011). El problema de la doble contingencia en la interacción comunicativa –que deja atrás la visión de Parsons respecto de la suposición de un trasfondo cultural compartido– impone la necesidad de entender el fenómeno mismo de la interacción comunicativa como un fenómeno contingente, no necesario y por tanto, meramente probable. Sin embargo, el objetivo de Luhmann no fue determinar qué tan probable o improbable es la interacción en contextos de doble contingencia, por lo que no en su teoría no preocupa el aspecto más cuantitativo de la interacción, es decir, ¿a mayor interacción, se genera mayor convergencia, un orden social más general y extensivo, más estructuras de expectativas compartidas? Es necesario, por tanto, hacer nuevas preguntas en esta línea, extendiendo las fronteras de la teoría luhmanniana.

Es en este contexto teórico que emerge la pregunta por la probabilidad de interacción que orienta esta tesis: ¿Cuáles son los efectos en la evolución

sociocultural de la probabilidad de interacción diferenciada según las condiciones ecológicas en las que las interacciones ocurran?

La pregunta por los efectos de la probabilidad diferenciada de interacción en la evolución cultural y por si más comunicación implica mayor convergencia, conducen a su vez a la pregunta por si la homogeneidad o heterogeneidad cultural se distribuye de modo diferenciado según la probabilidad de interacción dada por las condiciones ecológicas. Aunque Luhmann considera en su teoría de los sistemas sociales –especialmente respecto del acoplamiento estructural entre distintos niveles biológicos, psicológicos y sociales– requiere complementar la teoría con ciertos aportes de la psicología evolucionista. Asimismo, la teoría luhmanniana no posee herramientas metodológicas para abordar este problema, por lo que esta investigación deberá también recurrir a los algoritmos de la complejidad. A apuesta de esta investigación es que mediante un enfoque combinado de diversas perspectivas epistemológicas, teóricas y metodológicas, integrados en una estructura coherente, permitirán responder a la pregunta por los efectos de la probabilidad diferenciada de interacción en la evolución.

### **1.1 Motivación y relevancia**

Como probablemente todos los esfuerzos de investigación, esta tesis tiene varias fuentes de motivación, una de las cuales es la motivación principal y las otras son secundarias. Es esperable, y ocurre en este caso, la motivación está estrechamente vinculada con los distintos tipos de relevancia de la investigación social.

Las formas tradicionales de iniciar un trabajo de investigación pueden clasificarse en tres grandes grupos: por un lado, se puede iniciar deduciendo de la teoría social alguna pregunta de investigación de carácter teórico que opere como hipótesis a corroborar. Esta primera forma de motivación dice relación con la relevancia teórica de la pregunta. En esta tesis de magíster, el componente teórico es relevante y constituye una de las motivaciones centrales del proyecto:

responder a la pregunta por los efectos de la probabilidad diferenciada de interacción comunicativa.

Una segunda manera de proceder es inducir una pregunta de investigación a partir de una constatación empírica a partir de un conjunto de datos, que permiten intuir una regularidad general. Especialmente debe atenderse al *serendipity* o al dato anómalo que moviliza esfuerzos de pesquisa, habitualmente de carácter exploratorio. En estos casos, la relevancia también es fundamentalmente teórica, en la medida que lo que se pretende es dar respuesta a una interrogante, esta vez surgida de los datos. En la presente investigación existe variada investigación estadística y teorías asociadas a los datos. Por ello, aunque posee un componente de interpretación de datos, no corresponde a la relevancia central de la tesis: esta investigación utiliza el patrón geográfico de diversidad cultural como un fenómeno social suficientemente robusto y bien descrito sobre el cuál puede plantearse la pregunta por la probabilidad de interacción.

La tercera forma tradicional de proceder en una investigación es por medio de la identificación de un problema social o político que requiera una solución. En este caso, la motivación dice relación con establecer procedimientos de mejoramiento de tales o cuales condiciones en algún fenómeno social y la relevancia asociada es fundamentalmente práctica. Debido a la naturaleza del problema del patrón de diversidad cultural, no se identifican aplicaciones prácticas al conocimiento que se obtenga, por lo que no se declara ninguna relevancia práctica. La aplicabilidad del conocimiento, por tanto, no constituye la motivación de esta tesis.

Por otra parte, una manera no tradicional de inspirar una investigación dice relación con búsqueda de un problema de investigación que resulte adecuado con una metodología particular. Esta forma no está descrita en los textos de metodología ni epistemología tradicionales, en la medida que parece no ser lógico encontrar una pregunta de investigación que se adecúe a una cierta metodología. Sin embargo, parece válido que el interés metodológico sea la principal motivación

para realizar esta investigación, en la medida que se respete la adecuación o isomorfismo entre el modelo y el fenómeno a explicar, incorporando la relevancia teórica una vez identificado el problema. Esta es la motivación principal de esta tesis: abrir camino en la instalación de la metodología de modelamiento matemático–computacional en base a agentes en las ciencias sociales. La relevancia metodológica de la investigación, es, por tanto, el aspecto central de su justificación.

Por otra parte, aún no hay claridad respecto de la posibilidad de aplicación de metodologías cuantitativas desde la perspectiva de Luhmann. En este sentido, una de las contribuciones que motiva esta investigación es la vinculación de la teoría de sistemas –base conceptual del programa de magíster– a la estrategia metodológica del modelamiento matemático y computacional. Adicionalmente, esta motivación entrega algún nivel de relevancia práctica a la tesis.

Ahora bien, en el período de formulación de la investigación se evaluaron diferentes temáticas que podrían ser abordadas por medio de un modelo en base a agentes: algunas consistían en problemas de investigación exploratorios, sin disponibilidad de un conocimiento acumulado del fenómeno, pero se optó por una problemática ya desarrollada desde otras perspectivas pero que nunca haya sido abordada desde el modelamiento en base a agentes.

Por ello, al descubrir el problema del patrón de diversidad cultural y el gradiente latitudinal que ha sido demostrado en varias investigaciones actuales y de primera línea, se optó por atender a este fenómeno descrito por la ecología cultural. En esta decisión, se incorporaron –ya al proceso en marcha– una serie de motivaciones teóricas asociadas él. Como primer elemento, las ciencias sociales difícilmente encuentran correlaciones con un coeficiente de determinación de 0,60 como reportan Collard y Foley (2002), en la diversidad cultural y lluvia –que a su vez está altamente correlacionado con la latitud– lo que exige una explicación más allá de los intentos conjeturales que ha habido hasta el momento. En este sentido,

tener éxito en este proyecto de tesis puede entrar en la discusión respecto de la diversidad cultural desde una nueva perspectiva.

En síntesis, esta investigación encuentra en la metodología de modelación matemática y computacional el mayor interés, a lo cual se agrega haber encontrado una problemática de investigación –el patrón de diversidad cultural– que se está discutiendo en revistas de alto impacto en la actualidad. No hay, en este trabajo, una motivación de influencia práctica.

El aporte principal de la presente investigación es de carácter eminentemente teórico y metodológico.

El aporte teórico consiste en aportar con conocimiento basado en evidencia a la comunidad de las ciencias sociales, específicamente respecto de la pregunta por los efectos de la probabilidad diferenciada de interacción en la configuración de los sistemas sociales. La presente tesis es relevante en la medida que destaca que la cantidad y distribución de interacciones comunicativas es un elemento central en la conformación de la sociedad humana, entendida como compuesta de comunicaciones. Específicamente a la teoría de Luhmann, esta investigación complementa la teoría de la comunicación con la introducción de los efectos de las diferencias cuantitativas y no sólo cualitativas de la probabilidad de comunicación, que no están explícitamente desarrollados en la teoría del sociólogo alemán.

En segundo lugar, esta tesis corresponde a una generalización del modelo de diseminación cultural de Axelrod de 1997, en la medida que en ese texto la probabilidad de interacción sólo depende de las condiciones sociales de igualdad –en el sentido de distinciones compartidas– y no hay una probabilidad diferenciada de interacción comunicativa. En este sentido, el trabajo de Axelrod sería un caso particular del modelo de probabilidad de interacción diferenciada, en el cual el peso del factor ecológico es tendiente a 0 o bien, se acerca en la gran mayoría de las veces a cero.

En términos metodológicos estrictos, el presente trabajo constituye una innovación en la medida que se modifica el modelo de Axelrod para incorporarle la regla de la probabilidad diferenciada de interacción. Aunque al modelo de diseminación cultural han incorporado varias alteraciones para responder preguntas específicas, ninguna de ellas aborda los efectos de la probabilidad diferenciada de interacción y ninguno de ellos ha sido desarrollado en Chile o en América Latina.

El aporte práctico es menor y dice relación con la promoción del uso de modelamiento computacional en el programa de investigación de sistemas sociales de inspiración luhmanniana. Aunque a nivel internacional el modelamiento computacional de sistemas sociales desde esta perspectiva teórica ya cuenta con algunas investigaciones, el desarrollo en América Latina y en Chile en particular es virtualmente inexistente. Este trabajo pretende ser un paso en la dirección de construir y consolidar un programa de investigación de sociología computacional en la comunidad de las ciencias sociales en Chile.

## **2 MARCO DE ANTECEDENTES**

La investigación respecto de los efectos de la probabilidad diferenciada de interacción en la formación de estructuras sociales más o menos homogéneas requiere un contexto y un fenómeno social suficientemente robusto, de modo de poner a prueba el proceso de interacción más que en el cuestionamiento de los resultados de la misma. La tesis que se intenta sostener es que la cantidad de comunicación –dada por la probabilidad de interacción diferenciada– tiene importantes efectos en la diferenciación social.

Las sociedades humanas muestran notorios niveles de diversidad en lo que respecta a estructuras sociales, distribución geográfica, tamaño de las poblaciones, sistemas económicos, estructuras normativas, configuración familiar y complejidad entre otros factores (Nettle, 2009). Las formas de diferenciación social pueden observarse tanto dentro de una sociedad como en la comparación entre sociedades. Las ciencias sociales tradicionalmente se han enfocado más en analizar las diferenciaciones internas de una sociedad, encontrando habitualmente explicaciones endógenas a la misma sociedad (Tooby & Cosmides, 1992; Nettle, 2009; Haidt, 2007). En gran medida, estas corrientes teóricas han tendido a reconocer la diferenciación entre sociedades como producto de procesos diferenciados de modernización: sociedades tradicionales y sociedades modernas (Durkheim, 1999; Tönnies, 1947), sociedades de centro y sociedades periféricas, sociedades funcionalmente diferenciadas y sociedades segmentariamente diferenciadas (Luhmann, 2007). Estas interpretaciones, herederas de la tradición del denominado modelo estándar de las ciencias sociales (Tooby y Cosmides, 1992) atribuyen gran parte de la variación en la diversidad cultural a factores endógenos de las sociedades. La incorporación de elementos psicológicos, biológicos, ambientales y ecológicos a la interpretación de fenómenos sociales posibilita nuevas conceptualizaciones –más complejas– que tienen una vocación interdisciplinaria respecto del problema de la diversidad en lo social.

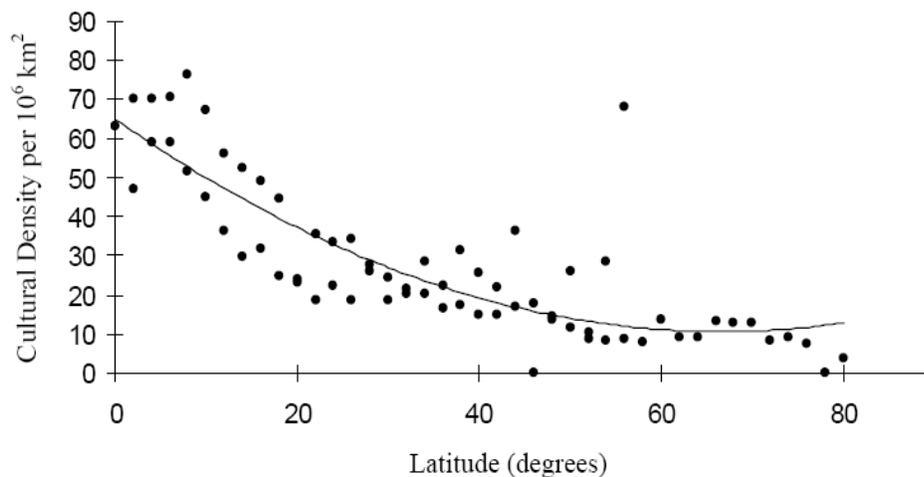
Teniendo en consideración la diversidad cultural no es la única forma de abordarla diferenciación social, ésta puede también operacionalizarse de modo geográfico, según la relación diferencial que puede encontrarse entre culturas (entendidas como unidades antropológicas diferenciadas según lengua, religión, estructura de parentesco, estrategia económica, organización política, etc.) y su concentración o dispersión en áreas geográficas. Diversidad cultural, en este sentido, puede entenderse como “densidad cultural” por área (Collard & Foley, 2002) o bien como extensión territorial de un lenguaje (Currie & Mace, 2009). Estos autores, provenientes de área de la ecología cultural –la ciencia que estudia cómo varían las condiciones culturales en distintos entornos sociales y ambientes– han identificado un patrón geográfico latitudinal de distribución de la diversidad cultural. El patrón es inusualmente robusto para las ciencias sociales y, como lo ha planteado Nettle (2009), estas diferencias se deben a la probabilidad diferenciada de interacción que tienen las unidades culturales según la latitud en la que se encuentren. Entre las explicaciones más plausibles se han propuesto la influencia de la concentración de patógenos, la disponibilidad diferenciada de alimentos y la complejidad política de las culturas. Sin embargo, independiente de cuál sea la explicación más certera, el mecanismo común tras todos los intentos teóricos que se están realizando es que las condiciones ambientales predisponen a las culturas a una mayor o menor probabilidad de interacción comunicativa entre ellas.

La presente investigación no intentará verificar o falsear la existencia del patrón geográfico, ni apoyar a una u otra corriente de interpretación. Por el contrario, esta tesis pretende modelar el mecanismo de probabilización e improbabilización de la interacción comunicativa entre los diversos sistemas socio-culturales, para observar los efectos que emergen de esta interacción a nivel agregado o macro-estructural. En este sentido, el patrón geográfico global de diversidad cultural es un antecedente de la investigación y no parte del marco teórico.

## 2.1 El patrón geográfico de diversidad cultural

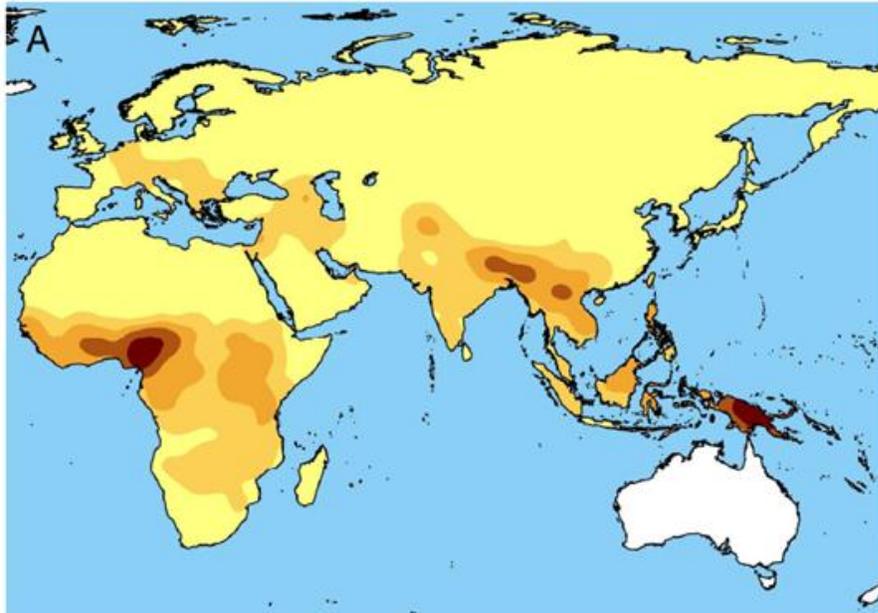
Diversos estudios –tanto de carácter global como regional– han destacado el evidente patrón distributivo de la diversidad cultural, asociado al gradiente latitudinal, de modo que la diversidad cultural es mayor hacia la línea del ecuador y se reduce hacia los polos.

Gráfico 1 – Densidad (diversidad) cultural por latitud (Collard y Foley, 2002)



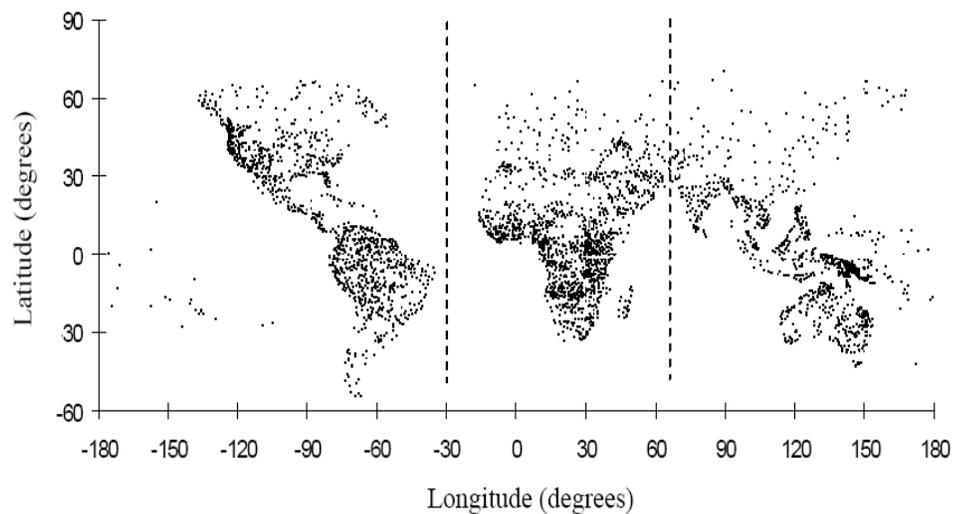
Esto ha sido evidenciado tanto a nivel continental, por ejemplo, en el caso de África (Moore et al, 2010, Nettle, 1996) y América del Norte (Mace & Pagel, 1995), y también a nivel global (Fincher & Thornhill, 2008a-2008b; Nettle, 1998; Collard & Foley, 2002; Cashdan, 2001), entre otros estudios.

Gráfico 2 – Mapa de calor de la diversidad etnolingüística en Europa, Asia y África (Currie y Mace, 2009)



En la figura siguiente, se reproduce el gráfico de Collard y Foley (2002) respecto de la mayor concentración de “culturas” en latitudes más bajas.

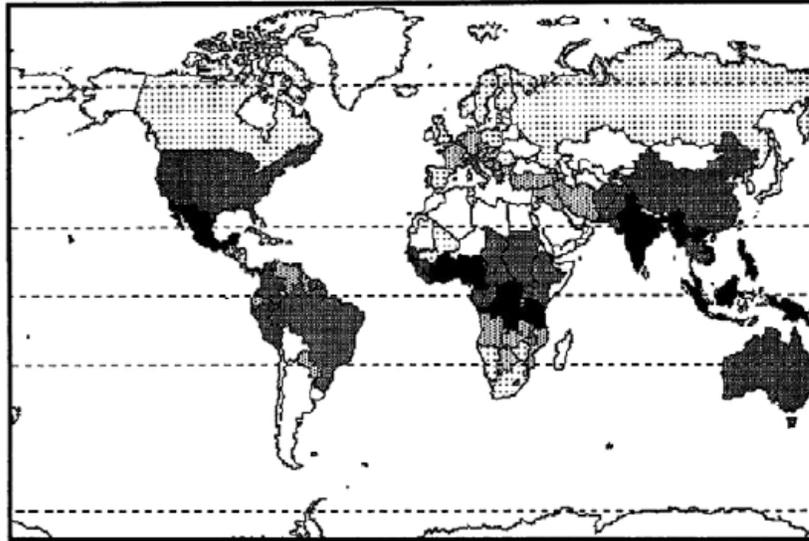
Gráfico 3 – Mapa del patrón geográfico mundial de diversidad cultural (Collard y Foley, 2002)



Por otra parte, el trabajo de Nettle (1998, 2009) encontró patrones similares respecto de la densidad de lenguajes –que sirve como proxy del concepto de

cultura— en tanto se encontró una mayor cantidad de grupos etnolingüísticos por área hacia las zonas más templadas del globo, pues cada uno de ellos ocupaba rangos territoriales menores en comparación a las zonas subtropicales.

Gráfico 4 – Patrón global de densidad lingüística (Nettle, 2009)



En la interpretación de Nettle (2009), esta relación entre latitud y diversidad lingüística también se encuentra al analizar la diversidad de plantas y animales según latitud, lo que da origen a una línea de interpretación respecto de la importancia de las condiciones ambientales para la generación de este patrón.

La diversidad cultural humana se da en múltiples niveles y, para explicarla, se ha recurrido a varias explicaciones. No todas estas explicaciones han tenido los mismos rendimientos. Collard y Foley (2002) distinguen tres grandes líneas de explicación:

1. La diversidad cultural se explica sólo por factores endógenos a las sociedades. Esta línea interpretativa atiende meramente a los eventos históricos y procesos sociales independientes de las condiciones del entorno del sistema, lo que no le permite dar cuenta del patrón global de distribución cultural.
2. Una versión más neutral propone que es el tiempo durante el cual se ha desarrollado una población humana la que conduce a las formas de

diferenciación que llevan a los patrones observados. Esta visión, sin embargo, no daría cuenta de la homogeneidad del patrón entre una región recientemente poblado como las Américas con sólo 20 mil años desde su poblamiento, frente a África, que tendría 400 mil años de despliegue de poblaciones humanas.

3. Una alternativa más compleja sostiene que la diversidad cultural se explica por los efectos de constricciones y posibilitaciones ambientales a las formas culturales humanas: biomasa, productividad de la tierra, estacionalidad, patógenos, etc. Este último conjunto de hipótesis han tenido mayor desarrollo, pero las explicaciones –y metodologías habituales– ofrecen más bien explicaciones conjeturales.

Esta tercera vía explicativa, en la medida que se eviten reduccionismos de la ecología cultural y permite que se integren conceptualizaciones provenientes de las ciencias sociales respecto de los procesos de selección comunicativa, será la que orientará esta investigación.

La gran mayoría de las explicaciones del patrón geográfico global de diversidad cultural que se han propuesto tienen como elemento común el hecho de que ciertas condiciones ambientales generan –a nivel social– una menor probabilidad de interacción comunicacional entre sociedades, tribus o culturas distintas. El mecanismo opera tanto a nivel de tendencia a la convergencia cultural (en la medida que si hay menos productividad primaria, hay menos disponibilidad de alimentos y por tanto, mayor propensión a comerciar) y de divergencia cultural (la mayor prevalencia de patógenos fija ciertas distinciones que generan estructuras de expectativas que hacen menos probable que las unidades socio-culturales tiendan a converger. La tesis que se intentará sostener dice relación con la contrastación del fundamento común de todas estas explicaciones en base a una modelación basada en agentes cuya interacción se simulará en espacios geográficos de una sociedad artificial.

Si el modelo construido a partir de las explicaciones teóricas es simulado computacionalmente y se reproducen los patrones geográficos, se podría hablar de una explicación de la mecánica del sistema desde la ciencia generativa (Epstein, 1999). Sin embargo, un modelo social que dé cuenta de la complejidad del fenómeno de la diversidad cultural no sólo deberá clarificar la influencia de los factores ecológicos en aspectos biológicos y en las preferencias individuales, sino que requerirá una teoría de la sociedad como sistema autopoietico –emergente de su base biopsíquica– que contenga una teoría evolucionista de la selectividad social, de modo de soslayar los problemas de reduccionismo de la ecología cultural. La reconsideración de la teoría de Luhmann en función de los aportes de la psicología evolucionista otorga luces en esta dirección.

### **3 MARCO TEÓRICO**

Para la construcción de un modelo de probabilidad diferenciada de interacción que permita reproducir el gradiente latitudinal de diversidad cultural es necesario contar con un concepto de cultura apropiado y una teoría de la evolución sociocultural acorde. Del en este sentido, los aportes de la psicología evolucionista un marco integrado para la respuesta a preguntas de la ecología cultural. Sin embargo, no debe perderse de vista la importancia de los procesos propiamente sociales en la evolución cultural, por lo que debe evitarse caer en tanto en un determinismo ecológico como en un determinismo cultural.

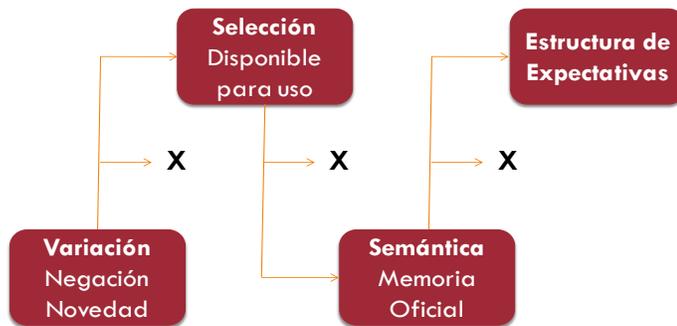
Finalmente, es necesario contar con un trasfondo epistemológico y con herramientas metodológicas que permitan dar cuenta de fenómenos complejos en que los patrones macro-estructurales emergen de la interacción local. Como son fenómenos prácticamente impredecibles y difícilmente modelables con técnicas tradicionales, se procederá utilizando los modelos basados en agentes –en tanto algoritmos de la complejidad (Vivanco, 2010)– para reproducir y modelar el sistema de evolución cultural con probabilidad diferenciada. En este sentido, una modificación de modelo de Axelrod (1997) de diseminación cultural para introducir esta condición es una buena alternativa para responder al problema de la evolución de los sistemas socioculturales en contextos ecológicos que imponen una probabilidad diferenciada de interacción según donde éstas se desarrollen.

#### **3.1 Una teoría de la evolución cultural y un concepto operativo de cultura**

La evolución ocurre a todo nivel sistémico. Desde la teoría de Luhmann, las condiciones de evolución comunicativa por medio de los mecanismos de variación, selección y re-estabilización, en los sistemas de interacción, los sistemas organizacionales y sistemas sociales. Esta evolución comunicativa ocurre incluso en el contexto de la improbabilidad de la comunicación y la doble contingencia, manteniéndose por medio de las expectativas y atribuciones.

La evolución socio-cultural en la teoría de Luhmann (2007), tiene como mecanismos principales la variación, selección y re-estabilización de distinciones. Esta evolución no es lineal ni necesaria, sino que contingente y probable, ya que una comunicación en proceso de selección o incluso en estabilización, puede ser rechazada y negada eventualmente.

Figura 1 – Proceso de evolución socio-cultural (Blanco et al. 2010)



A partir de una condición inicial previa, puede emerger una comunicación inesperada en el sistema, que niegue parte de la estructura comunicaciones previamente disponibles. En caso de que esta novedad sea seleccionada, implica que hay variación: la comunicación sorpresiva reproducción una desviación de la comunicación previa, pero siempre mediante de los elementos preexistentes en el sistema. La variación, por tanto “no es génesis espontánea de lo nuevo [...] sino producción divergente de elementos del sistema” (Luhmann, 2007: 364). Si una comunicación novedosa es reutilizada en nuevos eventos comunicativos, “forman estructuras idóneas para el uso repetido, capaces de construir y condensar expectativas” (Luhmann, 2007: 358). Si esta comunicación que varió es seleccionada recurrentemente, se dice que el ciclo evolutivo de la comunicación se constituye de expectativas. Así, la estabilización ocurre en la medida que las variaciones seleccionadas queden disponibles para usarse en nuevos eventos de comunicación.

La teoría de la diferenciación de Luhmann, sin embargo, no entrega elementos de análisis que permitan interpretar la evolución cultural en la medida que esta se entiende como la organización del sistema en términos de homogeneidad y heterogeneidad. En este sentido, las distinciones de diferenciación segmentaria, diferenciación centro-periferia, diferenciación funcional parecen dejar fuera la forma de diferenciación social que opera en la generación del patrón de diversidad cultural. ¿Qué sería la diversidad cultural? ¿Qué sería la diversidad geográfica en este contexto? Al parecer, esta la forma de diferenciación social del gradiente latitudinal descrito corresponde a la diferenciación segmentaria de unidades culturales.

En esta investigación, no es posible ni se pretende asumir toda la complejidad que involucra el concepto de cultura, sino que se utilizará un concepto operativo de cultura, que permita su utilización para formular teóricamente una teoría de la evolución cultural en función de la diferenciación segmentario. El concepto de cultura debe ser inespecífico respecto de los rasgos culturales y debe considera a la cultura como una unidad distinta de otras. Por ello, las definiciones de Collard y Foley (2002), combinadas con la definición de Axelrod (1997) proveen una visión adecuada para la modelación

El primer concepto operativo de cultura “The anthropological unit, ‘the culture’, refers to a social group that shares some set of traits such as language, dialect, belief system, political organisation, kinship system, etc., and which is distinct, either in its own view or the view of other such units” (Collard y Foley, 2002) (“La unidad antropológica, “la cultura”, refiere a un grupo social que comparte un conjunto de rasgos como lenguaje, dialecto, sistema de creencias, organización política, sistema de parentesco, etc., el cual es distinto a otros, ya sea desde su propio punto de vista como desde el punto de vista de otras unidades”). La definición de Axelrod, por su parte, ofrece una definición sencilla que permite modelar procesos de evolución: “culture is taken to be what social influence

influences” (Axelrod, 1997: 207) (“cultura se considera aquello influenciado por la influencia social”).

En este sentido, cultura es el set inespecífico de rasgos culturales, diferentes unos de otros, pero susceptibles de ser homogeneizados mediante la influencia social. El proceso de influencia social puede ser conceptualizado como un proceso evolutivo en el que las variaciones se producen en la medida que la influencia entre las distintas culturas va generando cambios a nivel interno en cada cultura.

Ahora bien, es necesario contar también con un mecanismo de transmisión cultural. Para ello Axelrod introduce una idea sencilla –pero fundamentada en base a diversa literatura– que en base a dos premisas de nivel individual que a su juicio son extrapolables a la difusión cultural: 1) “People are more likely to interact with others who share many of their cultural attributes” (es más probable que las personas interactúen con quienes comparten varios atributos culturales) y 2) “interactions between two people tend to increase the attributes they share” (Axelrod, 1997: 206) (las interacciones entre dos personas tienden a aumentar los atributos compartidos).

En este contexto, la presente investigación opera bajo la perspectiva teórica de que existe un proceso de evolución por medio de variación, selección y estabilización a nivel de la interacción entre unidades culturales y que esta interacción se probabiliza en la medida que la similaridad cultural es más alta. Del mismo modo, la interacción genera convergencia cultural, lo que implica que aumenta la probabilidad de interacción comunicativa ulterior, ya que los sistemas culturales van compartiendo estructuras de expectativas estabilizadas.

Sin embargo, esta evolución no ocurre con independencia de las condiciones ecológicas, como lo demuestran las investigaciones sobre el patrón geográfico de diversidad cultural según latitud. Es por ello que la investigación sobre la evolución cultural debe además introducir la relevancia de la probabilidad diferenciada de

interacción dados ciertos contextos ambientales. Esta visión de la evolución de los sistemas culturales debe ser complementada con los aportes de la psicología evolucionista, de modo de comprender de manera más integrada las condiciones de co-evolución entre los sistemas culturales en contextos ecológicos diferenciados y poder responder a la pregunta por la probabilidad diferenciada de interacción que estos generan.

### **3.2 Ecología cultural, psicología evolucionista y teoría de sistemas sociales**

Como se observa en la revisión del marco de antecedentes, las preguntas de la ecología cultural muchas veces encuentran respuestas que no pueden ser contestadas en función de explicaciones monolíticas o que sólo consideren una perspectiva teórica. De hecho, en general, las explicaciones recurren a una combinación de conceptos de diversas ciencias –naturales y sociales– para formular hipótesis plausibles para explicar fenómenos de este nivel de complejidad.

Si bien la sociología Luhmanniana ofrece un marco teórico para la explicación de ciertas formas de diferenciación social –en gran medida relacionada con el nivel de complejidad endógeno de los sistemas sociales– las teorías de la diferenciación social segmentaria, centro-periferia y funcional requieren ser complementadas para hacerse cargo del problema del patrón latitudinal de diversidad cultural. Es por ello, que en esta tesis se pretende intentar avanzar en complementar la teoría social de Luhmann, integrándola a lo que Tooby y Cosmides denominan la “nueva síntesis de las ciencias sociales” de modo de formular una perspectiva del que incorpore elementos ambientales, psicológicos y sociológicos en una explicación coherente.

Desde la teoría sociológica, el debate sobre la relación entre la estructura social y los agente individuales (Ritzer, 2003) ha identificado elementos importantes que deben ser considerados en una modelación basada en agentes que busca hacer reproducir condiciones de emergencia de fenómenos sociales, incorporando la

relación entre agentes y estructuras sociales. Sin embargo estas perspectivas aún mantienen una distancia con elementos más bien ecológicos. De todos modos, se advierte desde las ciencias sociales más tradicionales la necesidad de evitar el riesgo de “conflacionismos” (Mascareño, 2008). En esta línea, se reconoce 1) la irreductibilidad del comportamiento de los agentes a las condiciones de la estructura social, 2) la imposibilidad de entender el comportamiento de los agentes sin la influencia de la estructura social y 3) la temporalidad diferenciada que reconocer Archer (1995) y que recoge Mascareño (2008) de la disposición de agentes y emergencia de estructura, en la medida que se reconoce la preexistencia de agentes que interactúen para la constitución de estructura. Para la consistencia teórica de este trabajo, el modelo basado en agentes que se desarrollará para explicar el patrón geográfico de distribución global de la diversidad cultural deberá incorporar reglas de carácter individual y constricciones estructurales emergentes de la interacción de los agentes, pero deberá exceder estas visiones, ya que se requiere incorporar elementos psicológicos co-evolucionados ecológicamente con el ambiente.

Nettle (2009) revisó gran parte de las investigaciones recientes respecto de los patrones de diversidad cultural –respecto de múltiples fenómenos sociales– con el objetivo de exponer evidencia respecto de la influencia de los factores ecológicos en la explicación de esta diversidad. Se encuentran varias asociaciones que han sido recientemente documentadas entre variables sociales como el rango de extensión territorial de los grupos étnicos, la proporción diferencial de mujeres, la tasa de fertilidad, la duración e intensidad del cuidado parental (Quinlan, 2007), las preferencias de apareamiento, las restricciones normativas de la sexualidad (Schaller y Murray, 2008) y la orientación colectivista o individualista de las sociedades en distintos niveles del gradiente latitudinal. Las diferencias geográficas que se encontraron en estos aspectos se explican, principalmente, por la más alta prevalencia de patógenos en las zonas más templadas. Otras interpretaciones, como la de Curie & Mace (2009) encuentran la explicación de la distribución en los niveles de complejidad política de las sociedades: a mayor

latitud, mayor complejidad política y mayor dispersión de área lingüística, pero estos factores parecen ser posteriores a aquellos de carácter ambientales y al comportamiento individual.

Si bien la pregunta por el patrón latitudinal de diversidad cultural se formula en términos específicos de la ecología cultural, las formas de responder a la pregunta incorporan la interrelación entre elementos ambientales, psicológico y sociales. Esta combinación de elementos explicativos es propia de la perspectiva de la psicología evolucionista (*evolutionary psychology*). La psicología evolucionista es la aproximación que propone que los fenómenos del comportamiento y la cultura pueden ser entendidas como producto de la co-evolución entre los organismos, los grupos de organismos y el ambiente. La psicología evolucionista entiende las formas psicosociales actuales como adaptaciones psicológicas al entorno ambiental y social que ha acompañado el desarrollo evolutivo de personas y sociedades.

Aunque sugerentes, las explicaciones mediante *mecanismos psicológicos evolucionados* tienen en general una visión apegada al mecanismo de selección natural en la fijación de comportamientos individuales y colectivos. Esta perspectiva es correspondiente con la visión del cambio social en Luhmann, en la medida que la evolución comunicativa por variación, selección y estabilización recurre al mismo mecanismo causal de explicación.

Sin embargo, la psicología evolucionista desatiende en alguna medida los elementos endógenos a las sociedades, como las estructuras de expectativas y las condiciones de interacción comunicativas en la explicación de los fenómenos. Por el otro lado, la teoría Luhmanniana de los sistemas sociales autopoiéticos no deja mucho espacio para analizar la influencia de la co-evolución social-ambiental. La posibilidad y necesidad de incorporar la teoría de Luhmann a la nueva síntesis de las ciencias sociales abre la posibilidad de una explicación compleja y completa

a la fijación de patrones psico-sociales en la interacción evolucionista con el entorno.

### **3.3 Evolución sociocultural más allá del determinismo ecológico o social**

En la interpretación de patrones de diversidad, la ecología cultural –que ha sido secundaria en el desarrollo de las ciencias sociales– ha incurrido en cuatro problemáticas principales que ha impedido su progreso en la interpretación de los fenómenos sociales (Nettle, 2009): 1) Muchos de los datos utilizados inicialmente no eran comparativos, por lo que se cae en “just-so stories”<sup>1</sup>. En la actualidad, la evidencia comparada es un método fundamental para la ecología cultural. 2) Reduccionismo de la complejidad social a proteínas y beneficios: si bien frecuentemente es cierto que existen relaciones entre variables sociales y ambientales, siempre es falso que las variables ambientales sean suficientes para explicar la diversidad social. 3) Sesgo ingenuo hacia la selección de grupo no daba cuenta de la importancia de la selección individual. En gran medida, los esfuerzos actuales han superado este obstáculo. 4) Explicaciones vagas respecto de la emergencia y mantenimiento de los patrones requieren una mejor comprensión de los macro-fenómenos a partir de lo individual.

Las explicaciones funcionales de la sociedad –sean por la vía normativa, la decisión racional o la evolución seleccionista– pueden ser satisfactorias en la medida que no sean tautológicas o vacías, que no hagan analogías ilícitas y mientras no reduzcan la cultura a la biología. Con estas restricciones, parece ser que la versión de la evolución por selección es la alternativa más promisorio (Kincaid, 2007). Del mismo modo, esta alternativa teórica podría abordar el problema de lo social, más allá de explicaciones a partir del poder, de las normas, de la interacción espontánea, de las redes y del significado (Hechter & Horne, 2003, 31), incluyendo mecanismos no reductivos en la interpretación de lo social.

---

<sup>1</sup> Crítica clásica a la teoría de la evolución y otras explicaciones funcionales, aludiendo a los libros infantiles de Rudyard Kipling, que con argumentos fantásticos explicaba el largo de la trompa del elefante, las manchas del leopardo y la joroba del camello, entre otros fenómenos.

Así, Mundó (2005) declara que la psicología evolucionaria ofrece la necesaria conexión causal entre lo bio-psíquico y la complejidad irreductible de los fenómenos sociales. En este sentido, se ha destacado el rol que las ciencias sociales evolucionistas actuales habrían cumplido al desafiar las teorías más clásicas de la naturaleza humana sobre las cuales se construyen teorías sociales. Pinker (2006) criticó las doctrinas tradicionales de la *tabula rasa*, que han orientado a las ciencias sociales tradicionales. A juicio de Tooby y Cosmides (1992, 23-24), corresponden al “modelo estándar en ciencias sociales”. Estos autores evalúan que este modelo epistemológico corresponde a un aislacionismo de las ciencias sociales que le ha significado tener dificultades crónicas en la interpretación de lo social, sin dejar de reconocer sus virtudes explicativas.

Las ciencias sociales tradicionales se aislaron en base al conocido argumento de Kroeber (1975) sobre la sociedad como lo *superorgánico*. Ante esta interpretación, la teoría social se centró en los procesos de socialización y de interacción entre el individuo y la sociedad, haciendo del análisis cultural el elemento central y desvinculándose de las bases biológicas que posibilitan lo social (Berger & Luckmann, 1994). Casos como el enigma de Kaspar Hauser y el del “niño salvaje” proveen de sustento a esta forma de ciencias sociales que concibe a la mente como desprovista de herramientas intuitivas de comportamiento social.

Cuando la Sociobiología de Wilson, o “la nueva síntesis”, se pregunta por las condiciones de selección natural del altruismo, en tanto disminuye el *fitness* individual (Haines, 2007, 267), o bien cuando los psicólogos evolucionistas explican los comportamientos actuales por medio de adaptaciones a ambientes ancestrales (Haines, 2007, 282), o bien con los avances en psicología moral, con los principios intuicionistas (Haidt, 2007) se avanza en la misma línea. Aquí se propone que la teoría luhmannina de la evolución por selección de semánticas (comunicaciones) es compatible con el modelo causal integrado en la medida que el énfasis se ponga en el concepto de “acoplamiento estructural”. Los rendimientos de esta yuxtaposición teórica podrán obtenerse en la medida que se logre

mantener la condición autopoietica del sistema social –y su carácter emergente– reconociendo la disposición psíquica a la selección de ciertas comunicaciones por sobre otras. Esta solución se puede lograr atendiendo al primer principio de la nueva síntesis en psicología moral, que indica que la intuición tiene primacía pero no establece una dictadura sobre el comportamiento moral (Haidt, 2007) o bien atendiendo a la idea de la “Jaula Social” de Mariyanski y Turner (Haines, 2007, 292) que restringe culturalmente los rasgos genéticos.

La evolución, desde la teoría luhmanniana de sistemas sociales, es un proceso de diferenciación basado en la variación, la selección y la re-estabilización de comunicaciones: una teoría “neodarwinista” de la evolución (Luhmann, 2007, 355-359). Este mecanismo de cambio en la estructura de las comunicaciones puede explicar fenómenos sociales en la medida que se alteran las estructuras de expectativas. La teoría de Luhmann, por tanto, se inscribe dentro del conjunto de teorías metafóricas (analógicas) de la evolución cultural en tanto la sociedad constituiría algo distinto de la evolución biológica. Por ello, formaría parte del “modelo estándar de las ciencias sociales” (Tooby y Cosmides, 1992).

A través de este argumento, es posible explicar el problema de la probabilidad de lo improbable en la doble contingencia, es decir, el dilema de la coordinación y en último término, de lo social. El proceso comienza con una negación en la comunicación, que consiste en la introducción de una innovación que contradice la estructura de expectativas establecida previamente en el sistema. A esta desviación o variación de los elementos le sucede forzosamente una selección –ya sea positiva o negativa– en que se selecciona el estado actual o la innovación propuesta. Esto modifica estructura de expectativas del sistema y permite al sistema social evolucionar, amplificando su complejidad para reducir la complejidad del entorno (Luhmann, 2007, 360-298). Los dispositivos comunicativos que se consolidan en sistemas funcionales se denominan medios de comunicación simbólicamente generalizados y sirven de plataforma para las transformaciones semánticas. De este modo, la explicación luhmanniana de la

evolución de las ideas es selectiva y se realiza únicamente por medio de mecanismos sociales (Luhmann, 2007, 424-439).

Desde esta perspectiva, la sociedad es un sistema autopoietico emergente que opera con lógicas distintas a las de los sistemas psíquicos. Es mediante el concepto de “acoplamiento estructural” de estos sistemas en los cuales puede conciliarse la teoría de Luhmann en el modelo causal integrado, en la medida que para entender el proceso de selección de comunicaciones (sedimentación de semánticas) pueda recurrirse a descubrimientos de la psicología moral evolucionista. De este modo, el problema de la doble contingencia se abordaría por medio de una explicación multinivel, unificadora y que puede resolver tanto las causas últimas como las causas próximas y enfrentando algunos de los desafíos pendientes de las ciencias sociales evolucionistas (Haines, 2007, 293-299), así como las dificultades que genera la teoría memética de Dawkins (Lewens, 2007).

Los teóricos del modelo causal integrado destacan las capacidades genéticas para desarrollar cultura, sin desconsiderar la importancia de la cultura en la explicación del comportamiento. Por ejemplo, para Dawkins, los “memes” son replicadores culturales que se propagan por imitación (Dawkins, 2006, 192). Desde la teoría de Luhmann, es posible complejizar la comprensión del fenómeno de la imitación memética por medio de la variación, selección y re-estabilización, e incorporando el condicionamiento por parte de rasgos psicológicos como mecanismos selectivos. Este fenómeno puede ser observado en el carácter del acoplamiento estructural entre sistemas psíquicos y sociales (emergentes), en tanto involucra elementos tanto intuitivos como sociales de selección. Asimismo, los sistemas psíquicos se encuentran acoplados a los sistemas biológicos (cuerpos) por lo que la misma relación de construcción y posibilitación se establece en la medida que el cuerpo requiere adaptarse al entorno para mantener su autopoiesis.

En su descripción del acoplamiento estructural entre sistemas psíquicos y sociales el autor reconoce la necesidad de prestaciones de la conciencia para la

comunicación (Luhmann, 2007, 75) pero, por otro lado, señala que no existe comunicación entre conciencias que no esté socialmente mediadas (Luhmann, 2007, 76). Al considerar los avances de la psicología evolucionaria, las intuiciones morales y los rasgos evolutivos estarían dotando de algún contenido –moral e intuitivo– previo a los mecanismos de selección social. Tales caracteres psicológicos funcionarían como disposiciones mentales para la selección social de comunicaciones, sin interferir con el carácter autopoietico de los sistemas. El acoplamiento estructural entre sistemas psíquicos y sociales provee el escenario para estudiar el problema de la selección de comunicaciones, del orden, de la coordinación y, en último término, de la “jaula social”. En el acoplamiento estructural, es el médium del sentido –que es un espacio de interacción de los excedentes de posibilidades internas de los sistemas psíquicos y sociales– el que permite/limita la selección de comunicaciones (Luhmann, 2007, 73). Corresponde al encuentro, confrontación y relativa continuidad entre las condiciones mentales adaptadas evolutivamente (que *predisponen* a un tipo de coordinación) y las selecciones sociales de comunicación (que *posibilitan* un tipo de coordinación).

Atender al acoplamiento estructural entre sistemas psíquicos y sociales como espacio de determinación de mecanismos selectivos tiene una serie de ventajas epistemológicas. 1) Permite dar una explicación más acabada del mecanismo de propagación vertical y horizontal de memes, recurriendo a los mecanismos de la variación, selección y re-estabilización. De este modo, se resuelve el problema de la replicación idéntica de memes, se evita entender a los memes como “linajes” de ideas y se soslaya el problema de la atomización de los memes (Lewens, 2007), en tanto se supera el isomorfismo genético-memético, manteniendo la concepción general de evolución cultural. 2) Por otra parte, se posibilita la resolución del problema de la distancia entre causas próximas y causas evolucionarias, ya que se abre la posibilidad de analizar la selección de comunicaciones en multinivel, como disposición mental y selección social de comunicaciones (Haines, 2007, 293-299). Además, 3) la teoría luhmanniana se integraría al “nuevo modelo causal integrado” –con la teoría de la evolución como visión unificadora– con importantes

aportes en la comprensión de la selección social. 4) Permitiría interpretar lo social desde una perspectiva no reduccionista ni cultural ni biológica.

Por otro lado, la incorporación de un rol para los mecanismos psicológicos evolutivos en la selección de comunicaciones a nivel social pone en entredicho el constructivismo (en una versión fuerte) de la teoría luhmanniana como mecanismo explicativo para todo orden de fenómenos. En la medida que hay contenidos intuitivos que están también en el observador, será necesario afinar estas las consideraciones de la teoría de sistemas sociales a estas nuevas condiciones. Cabe por tanto revisar empíricamente sus posibilidades reales de consolidación y atendiendo a las con-fusiones entre constructivismo y realismo ontológico (Blanco, 2005) a las que esta alternativa teórica cercana al constructivismo biológico pueda conducir.

Esta relectura de la teoría de los sistemas sociales autopoieticos de Luhmann con los aportes de la psicología evolucionista permite, por tanto, la generación de explicaciones más complejas –incorporando también a los sistemas psíquicos– de los fenómenos sociales, posibilitando su tránsito del modelo estándar al modelo causal integrado en ciencias sociales. No sólo puede contribuir al desarrollo de la ecología cultural, sino que al introducir una perspectiva más compleja, aumenta su potencia explicativa y facilita el diálogo de la sociología con perspectivas biológicas, ecológicas y evolucionarias (Giraldo, 2004), otorga nuevas luces sobre la discusión micro-macro (Salles, 2001) y puede responder a la necesidad de comprender la emergencia de propiedades sociales de la interacción escalada de condiciones y decisiones individuales (Nettle, 2009). Es en base a una teoría ampliada de la selectividad social que será posible modelar la diversidad cultural global.

### **3.4 Teoría de la complejidad y modelamiento en las ciencias sociales**

Las ciencias sociales han venido incorporando la teoría de la complejidad progresivamente en las últimas décadas, unas con mayor celeridad que otras. En este sentido “resulta evidente que existe una apertura o un acercamiento –por motivos y con énfasis diferentes– entre las ciencias sociales y humanas y el estudio de fenómenos caracterizados por no-linealidad, emergencia, autoorganización, equilibrios dinámicos y comportamientos aperiódicos” (Maldonado, 2009). En este punto del desarrollo de la teoría sociológica, no parece posible pensar los fenómenos sociales sin referencia a tales condiciones.

Una buena parte de la teoría social considera que las sociedades son sistemas dinámicos, complejos, adaptativos, caracterizados por la emergencia, por lo impredecible y por su comportamiento no-lineal. Muchos de estos conceptos están desarrollados en la concepción de la sociedad de Luhmann, pero han sido escasamente operacionalizados en algoritmos de la complejidad (con la excepción de algunos modelos de Leydesdorff, 2005 y 2010). En general, los fundamentos teóricos utilizados por quienes se dedican a modelar vienen de teorías de alcance medio de corte económico o psicosocial. Sin embargo, la vinculación de la teoría luhmanniana con la teoría de la complejidad, la ponen en la posición de candidato seguro a poder ser operacionalizada por los algoritmos de la complejidad.

Aunque hay una gran cantidad de entradas teórica y metodológicas a las ciencias sociales desde la teoría de la complejidad (extensivamente descritas en Vivanco, 2010), una de las más relevantes ha sido el modelamiento basado en agentes. Los modelos multi-agentes han sido el algoritmo de la complejidad más frecuentemente utilizado y en la actualidad gozan de una gran difusión en las ciencias sociales, por lo que se espera que su desarrollo se incremente en las próximas décadas.

Para introducir la teoría de la complejidad por medio del modelamiento basado en agentes a la investigación en ciencias sociales, primero se revisarán los fundamentos epistemológicos, teóricos y metodológicos de los modelos clásicos, para luego pasar a sentar las bases para construir un modelo basado en agentes de inspiración luhmanniana.

Esta investigación utiliza la perspectiva de la teoría de la complejidad en ciencias sociales como enfoque epistemológico, la teoría social de los sistemas de comunicación de Luhmann como fundamento teórico y el modelamiento basado en agentes como herramienta metodológica. Lo anterior, en el convencimiento de que un problema complejo como los efectos de la probabilidad diferenciada de interacción en sistemas sociales complejos como lo son los sistemas socioculturales, sólo puede abordarse desde una perspectiva que no reduzca la complejidad si no que la asuma dejando emerger la auto-organización y los patrones macroestructurales del acoplamiento estructural de la interacción local de sus componentes. Es por ello que una de las herramientas centrales de las ciencias sociales ligadas a la teoría de la complejidad es el modelamiento computacional en base a agentes.

La investigación en base a modelos computacionales basados en agentes es una nueva herramienta para la investigación social empírica que permite estudiar fenómenos emergentes a partir de interacciones individuales (Epstein, 1999). Los modelos y simulaciones se han difundido en múltiples áreas del conocimiento desde que el desarrollo de la computación alcanzó un nivel de desarrollo suficiente. Las ciencias sociales –aunque tardíamente– están integrándose a estos desarrollos, formalizando sus modelos teóricos y convirtiéndolos en modelos explícitos que pueden ser formulados computacionalmente. Los objetivos de la modelación (Epstein, 2008) exceden la explicación e incluso podrían predecir (Thompson & Derr, 2009), por lo que serían útiles para la interpretación de fenómenos sociales. Sin embargo, no existe una clara metodología para la modelación, aunque hay una serie de intentos de formalización (Cioffi-Revilla,

2010). También hay dificultades respecto del status epistemológico de la investigación con modelos computacionales, pues aluden a un tipo de empiricidad particular: son experimentales en un sentido especial que permite al investigador social tener un laboratorio computacional, lo que los pondría en una posición de realismo débil (Phan & Varene, 2010), cercano al constructivismo epistemológico. Sin embargo, hay trabajos que demuestran que los modelos y simulaciones no son sólo útiles para la definición y comprensión de fenómenos emergentes, sino que serían apropiados para formalizar la emergencia (Baker, 2010). Específicamente, interesa la metodología de los autómatas celulares, debido a su presentación visual en un espacio virtual homólogo al geográfico.

Si bien, metodológicamente, la aplicación empírica de mayor desarrollo que existe en base a la teoría luhmanniana está representada por el paradigma sistémico constructivista y la perspectiva sociopoiética (Arnold, 1997) –en que la observación empírica de las ciencias sociales debe constituirse en una “observación de observaciones” o una observación de segundo orden (Arnold, 2005)– la perspectiva de los modelos sociales también ha mostrado un cierto desarrollo con inspiración luhmanniana en su observación de sistemas sociales.

La investigación basada en agentes ya ha sido probada para probar teorías geográficas (Sasaki & Box, 2003; Beltrán et al, 2009). Respecto del desarrollo de la perspectiva del modelamiento en base a la teoría de Luhmann sobre los sistemas sociales, ya existen algunos desarrollos importantes desde la perspectiva de modelos basados en agentes, que consideran la teoría matemática de la comunicación (Shannon, 1948) como fundamento. En el artículo de Barber, M., Blanchard, P., Buchinger, E., Cessac, B. & Streit, L. (2006) se diseñó un modelo que describe la emergencia del orden social en el contexto de la doble contingencia, basado en un trabajo previo que modela el escalamiento del orden social en Luhmann (Dittrich, P., Kron, T. & Banzhaf, W., 2003). En base a la asignación de memoria a los agentes del modelo, estos seleccionan información, la expresan en una conducta de notificación y luego se acepta o rechaza al recibir el mensaje, generando estructuras de expectativas en el proceso. Los autores

conceptualizan esto como un modelo de intercambio de mensajes. Las expectativas en base a la memoria resuelven el problema de la doble contingencia en base a la interacción que genera coordinación mediante estructuras que se construyen en el tiempo.

Otro intento de modelación computacional de la teoría de Luhmann es la propuesta de Leyesdorff (2005) que utiliza un autómata celular con el objetivo de visualizar un modelamiento matemático respecto de la incerteza en las observaciones de sistemas anticipatorios e históricos que operan en base a expectativas sociales.

En estas aproximaciones, es necesario que el razonamiento teórico y analítico sea especificado con claridad matemática para construir una representación visual apropiada de los fenómenos. Por ello, el modelamiento o modelación implica un esfuerzo teórico de explicitación y formalización de los supuestos de la teoría (Epstein, 2008). Sin embargo, la naturaleza social del fenómeno a estudiar hace esperable que el sistema siga siendo complejo y no trivial (Leydesdorff, 2005), por las múltiples dinámicas que interfieren en su operatoria. El modelo y la simulación como formas de observación, en correspondencia con la teoría (Luhmman, 1997), no pueden observar la totalidad del sistema, pero sí pueden describir, explicar y predecir<sup>2</sup> al menos parcialmente en base a la observación de la mecánica u operatoria del sistema.

### **3.4.1 Los autómatas celulares elementales de Wolfram**

Los autómatas celulares fueron originalmente desarrollados por John von Neumann en la década de 1940, quien se enfrentó al problema de construir una máquina que se auto-replicara. Wolfram, en su libro “Un nuevo tipo de ciencia” (2002) formalizó el estudio de los autómatas celulares e hizo una descripción exhaustiva de aquellos que eran “elementales”, es decir, que puedan ser programados en su forma más sencilla.

---

<sup>2</sup> Ver la discusión planteada en Epstein (2008) y la contra-respuesta en Thompson & Derr (2009).

Los autómatas celulares elementales consisten en sistemas dinámicos de evolución discreta, que se despliega en filas de celdas sucesivas según las condiciones de la fila anterior. A cada jugada, cada una de las células se “enciende” o se “apaga”, según ciertas reglas, lo cual es calculado según el estado de la fila anterior. En términos de visualización, las reglas se expresan en una tabla de referencia, donde las celdas o células representan el paso actual y las de abajo representan el siguiente paso. Lo interesante del AC es que el comportamiento de largo plazo del sistema “trasciende” las reglas simples que se le asignan. Es decir, esto significa que “emerge” un patrón no deducible, no obvio, no esperado, no trivial y, como es característico de los sistemas complejos, se obtienen resultados complejos a partir de reglas simples. Con su trabajo, Wolfram pone en discusión el hecho de que la computación digital –y así, por su isomorfismo, también otras ciencias formalizables computacionalmente– deben ser exploradas experimentalmente.

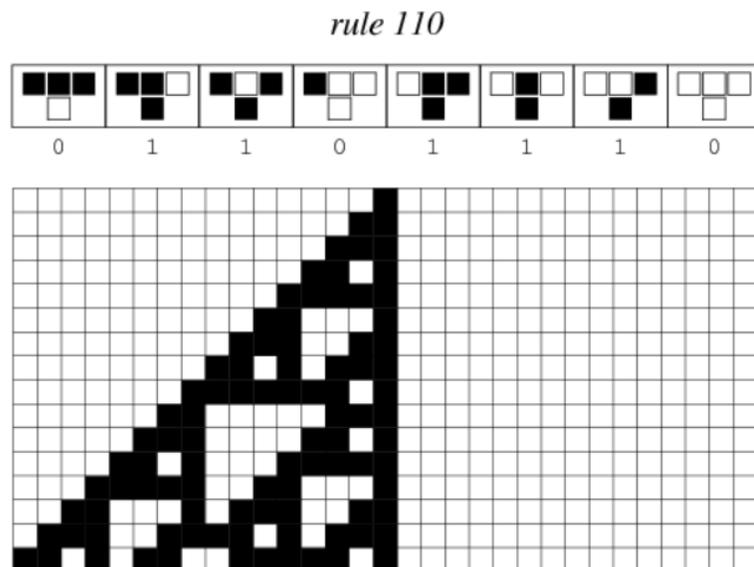
Los autómatas celulares más simples –sin ser triviales– son autómatas unidimensionales en los cuales las celdas pueden tener dos estados (encendido o apagado, 1 o 0, vivo o muerto) y cuya vecindad sean los vecinos de cada uno de los lados adyacentes. La vecindad puede tener cada una de sus células en estado apagado o encendido y eso define el estado que tomará la célula inferior en la jugada o tiempo siguiente. Como una vecindad elemental está compuesta de tres células, hay sólo ocho posibles combinaciones por vecindad, lo que significa que hay  $2^3 = 8$  reglas posibles en autómatas celulares elementales. Stephen Wolfram ha investigado cada una de estas reglas y ha descrito cuatro clases posibles de comportamiento de los autómatas celulares (AC) en el largo plazo:

Tabla 1 – Clases de comportamiento de los autómatas celulares elementales

CLASES DE AC	DESCRIPCIÓN
<b>Clase 1</b>	El sistema se estabiliza rápidamente en una configuración monolítica (todas las celdas encendidas o todas apagadas).
<b>Clase 2</b>	El sistema alcanza un estado cíclico periódico, estable pero dinámico.
<b>Clase 3</b>	El sistema muestra un comportamiento caótico sin orden determinable.
<b>Clase 4</b>	El sistema desarrolla un comportamiento complejo, con algún nivel de orden emergente, impredecible sin simulación.

La regla 110 genera un sistema de comportamiento de clase IV. Ha sido demostrado que la regla 110 es un computador universal o una máquina de Turing Universal, en la medida que cualquier programa algorítmico puede ser reproducido por medio de esta regla.

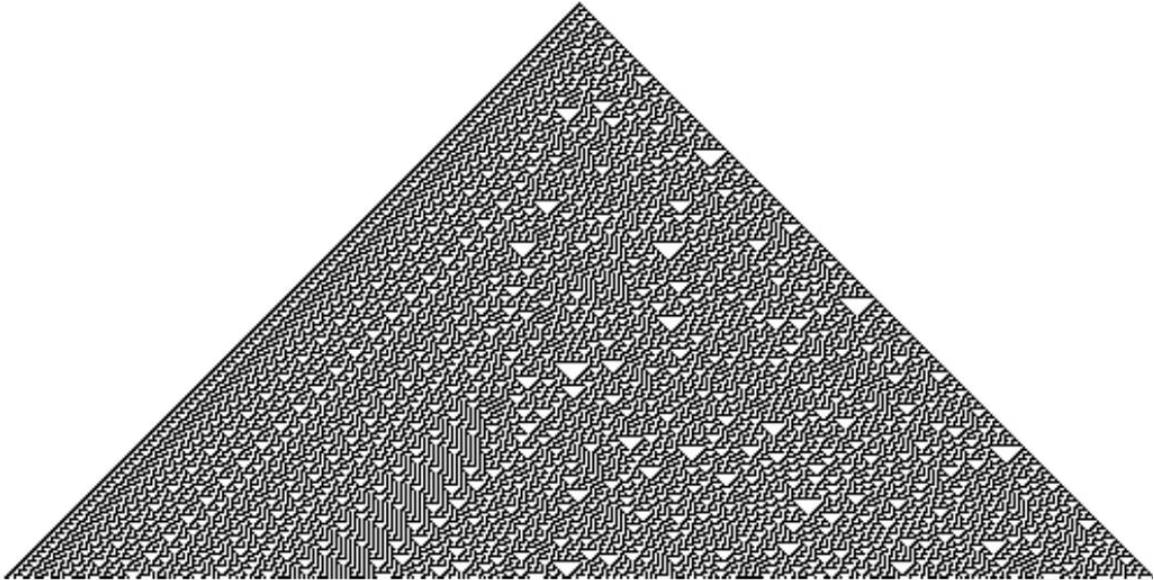
Figura 2 - Regla 110 de autómatas celulares elementales



Por otra parte, algunas de las reglas de los autómatas celulares elementales generan un patrón isomórficos respecto de los que pueden encontrarse en la

naturaleza, en paisajes y en animales, así como también en productos humanos como tejidos con patrones geométricos repetitivos.

Figura 3 – Regla 30 de autómatas celulares elementales



El patrón descrito en la regla 30 de los autómatas celulares en la denominación de Wolfram, que también se dice que podría ser una máquina de Turing universal, se asemeja sorprendentemente al patrón de la concha del cono geógrafo, un gasterópodo marino conidio venenoso.

Figura 4 – Cono geógrafo (*Conus textile*) con patrones de la regla 30 de autómatas celulares



También se han encontrado coincidencias de la forma que generan las reglas de autómatas celulares elementales respecto de fenómenos sociales. Por ejemplo, en la forma en que evolucionan las redes de corrupción en los establecimientos educativos (Osipian, 2008).

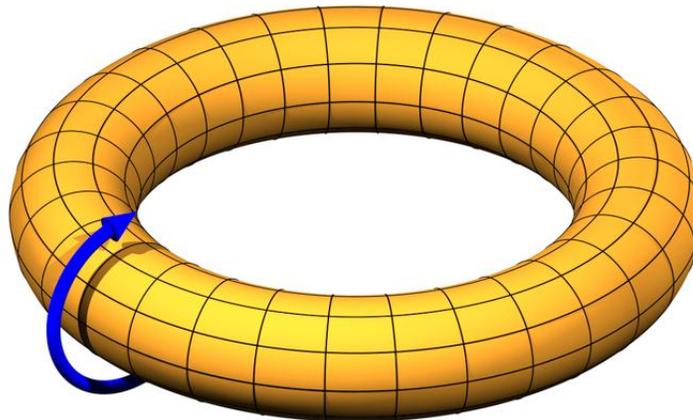
### **3.4.2 El juego de la vida de Conway**

El Juego de la Vida, creado por John Horton Conway en 1970 es uno de los desarrollos centrales en los autómatas celulares. El objetivo de Conway era genera una máquina que pudiera construir copias de sí misma, como el problema que Von Neumann planteara en los años 40. También llamado sencillamente Vida, el autómata opera sin jugadores y con reglas muy simples. Establecidas las condiciones iniciales, el modelo se pone a correr y se puede observar cómo elementos no proyectados comienzan a emerger en un sistema complejo a partir de reglas simples. En ciertas condiciones, el juego de la vida evoluciona reproduciendo copias de sí mismo y se auto-organiza, generando patrones sorprendentes que no pueden ser deducidos del sólo análisis de las reglas de funcionamiento.

Al representar fenómenos caracterizados por la emergencia y auto-organización, el Juego de la Vida permite observar cómo patrones complejos pueden provenir de la implementación de reglas muy sencillas. Esto se torna interesante, por su isomorfismo con otros sistemas físicos, biológicos y sociales, en que su evolución está determinada por el estado inicial y no necesita ninguna entrada de datos posterior para continuar evolucionando de forma autónoma.

El Juego de la Vida opera en una grilla toroidal visualizada en un cuadrado plano. Esto significa que la que extendida tiene la forma de un anillo, ya que el borde superior está conectado con el borde inferior y los bordes laterales también lo están.

Figura 5 – Representación de un torus o toroide (imagen: Wikipedia.org)



En esta grilla toroidal, el Juego de la Vida utiliza la Vecindad de Moore que considera las 8 casillas que rodean una celda, a diferencia de la Vecindad de Von Neumann, que sólo considera las casillas en posición ortogonal a la casilla de referencia.

Figura 6 – Vecindad de Von Neumann (izquierda) y Vecindad de Moore (derecha) (Imágenes: Wikibooks.org)



En el Juego de la Vida existen dos estados posibles de las células: éstas pueden estar "vivas" o "muertas", o bien "encendidas" o "apagadas", si se quisiera representar otro fenómeno. El modelo evoluciona en unidades de tiempo discretas conocidos como turnos o tics, por su denominación en Netlogo. A cada paso se consideran las condiciones previas para calcular el estado de las células al turno siguiente. Todas las células se actualizan simultáneamente. Las reglas de

operación son sorprendentemente simples, considerando los resultados complejos que emergen del modelo:

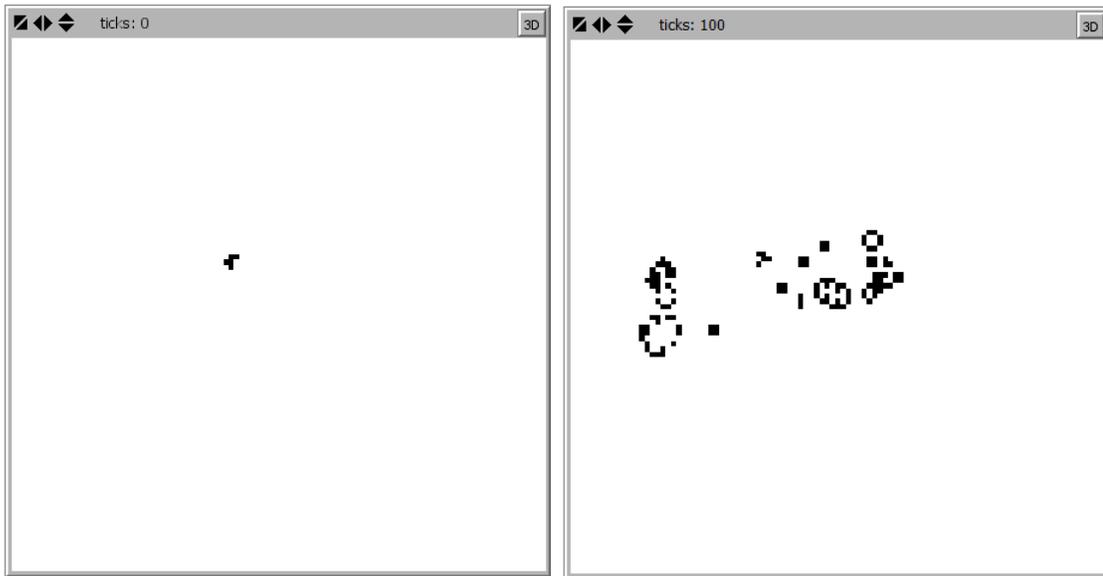
Tabla 2 – Reglas del juego de la vida

<b>REGLAS JUEVO DE LA VIDA</b>	<b>CONDICIÓN</b>
Sobrevivencia	Una célula viva con 2 ó 3 células vecinas vivas
Muerte por soledad	Una célula viva con menos de 2 vecinas vivas
Muerte por sobre población	Una célula viva con más de 3 vecinas vivas
Nacimiento o re-nacimiento	Una célula muerta con 3 células vecinas vivas

Aunque en la evolución del juego de la vida visualizada muchas veces da la sensación de movimiento, lo que ocurre es que la sucesiva muerte y nacimiento de células es lo que está efectivamente ocurriendo, ya que el Juego de la Vida es un autómata celular, por lo que sus “agentes” sólo tienen las propiedades de estado y posición, sin poder modificarla. En el lenguaje de Netlogo, el Juego de la Vida está programado en “patches” o parches.

Los pentominos, que consisten en la combinación de cinco celdas aledañas, han sido un descubrimiento notable de Conway para las ciencias de la complejidad. En especial el R pentomino (que después pasó a llamarse F Pentomino), que genera patrones complejos prácticamente impredecibles al ser corrido.

Figura 7 – Evolución del R Pentomino en el Juego de la Vida en tiempos 0 y 100 (Netlogo)



Como se observa en la figura anterior, iniciar el Juego de la Vida con un R Pentomino (la celda central acompañada de las celdas Norte, Noreste, Oeste y Sur) genera inmediatamente una gran profusión de “vida”. Ya en los 100 turnos o ticks se presenta un sistema en plena ebullición y expansión progresiva de celdas vivas a otros sectores de la grilla.

Figura 8 – Evolución del R Pentomino en el Juego de la Vida en tiempos 600 y 1500 (Netlogo)



En el tiempo 600 se han estabilizado algunos elementos, tanto osciladores como “aún viven”, que no cambian de estado pero permanecen, así como algunos “gliders” o naves que siguen “moviéndose”. El sistema se estabiliza con elementos estáticos y osciladores hacia el tiempo 1500.

### **3.5 Ciencia social generativa**

El Libro de Brian Epstein y Robert Axtell (1996) “Growing Artificial Societies: Social Science From The Bottom Up” constituye un sustento fundamental del edificio teórico de la modelación social computacional y la simulación de sociedades artificiales basadas en agentes. Heredero de los esfuerzos como el de Von Neumann que dieron origen a los autómatas celulares, el de Conway y su “juego de la vida”, las simulaciones de vida artificial de Reynolds y otros, el texto de Epstein y Axtell propone una sociología computacional desde la perspectiva que denominan “ciencia generativa”. Al enfatizar la interacción entre agentes en sociedad artificiales, la ciencia generativa ofrece un paradigma teórico-metodológico para el estudio de sistemas complejos, como el sistema de interacción cultural de probabilidad diferenciada.

La pregunta fundamental de la ciencia generativa es la siguiente: “¿Cómo se producen regularidades macroscópicas de fenómenos sociales desde el comportamiento heterogéneo de agentes individuales?”. Una serie de preguntas por diferentes fenómenos sociales como la formación de grupos, migraciones, propagación de enfermedades, guerras, comercio y transmisión cultural, entre otras pueden ser respondidas en base a esta perspectiva bottom up o “desde abajo” de la ciencia generativa.

Las respuestas a estas preguntas –desde la ciencia generativa– se basan en el supuesto base de esta perspectiva. En palabras de los autores: “*Fundamental social structures and group behaviors emerge from the interaction of individual agents operating on artificial environments under rules that place only bounded*

*demands on each agent's information and computational capacity*" (Epstein y Axtell, 1996); ("Las estructuras sociales fundamentales y comportamientos grupales emergen de la interacción de agentes individuales operando en ambientes artificiales bajo reglas que imponen demandas limitadas en las capacidades de información y computación de cada agente"). En este sentido, es posible entender un sistema social si uno puede "hacerlo crecer" desde la interacción entre los agentes.

El objetivo de la perspectiva de la ciencia generativa consiste en hacer emerger –a partir de la interacción de los agentes en un ambiente determinado– las propiedades de un sistema social. En términos de Schelling, esta perspectiva intenta dar cuenta de los microfundamentos para los macrocomportamientos sociales.

El enfoque de la ciencia es esencialmente distinto al del modelamiento top down o "desde arriba" que opera tradicionalmente en base, por ejemplo a ecuaciones diferenciales o modelos estadísticos en base a variables atribuidas a actores homogéneos. De hecho, la obra de los autores es en gran medida una crítica a esta manera clásica de modelar sociedades, no sólo dudar de sus supuestos teóricos, sino también por los resultados que obtienen y por los efectos prácticos de departamentalización de las ciencias sociales, al dificultar el trabajo interdisciplinario.

### **3.6 Modelos clásicos en ciencias sociales**

Para el desarrollo de la ciencia social generativa, además de los trabajos de Schelling, Conway y Wolfram, se han desarrollado una serie de modelos clásicos que atienden específicamente a fenómenos sociales y que se han convertido en referentes obligatorios para el modelamiento social contemporáneo.

En general, estos modelos –de carácter muy general y simple– no tienen como objetivo la reproducción fiel de la realidad observada en concordancia con los

datos de observaciones empíricas. Por el contrario, tienen como objetivo formalizar matemáticamente mecanismos sociales, explicitar los supuestos teóricos y empíricos con los que opera el fenómeno y ponerlos a prueba por medio de experimentos basados en simulaciones computacionales en modelos multi-agentes. Esto les permite a los autores clásicos obtener respuestas de carácter teórico-cualitativo respecto de su problema de estudio, independiente de que la formulación y programación del modelo sea de carácter cuantitativo.

Aunque existen varios otros modelos ampliamente difundidos, el modelo de segregación de Schelling de 1969, el modelo Sugarscape de Axtell y Epstein de 1996 y el modelo de diseminación cultural de Robert Axelrod son reconocidos en la literatura por sus importantes aportes a la simulación computacional de fenómenos sociales complejos.

### ***3.6.1 El modelo de segregación de Schelling***

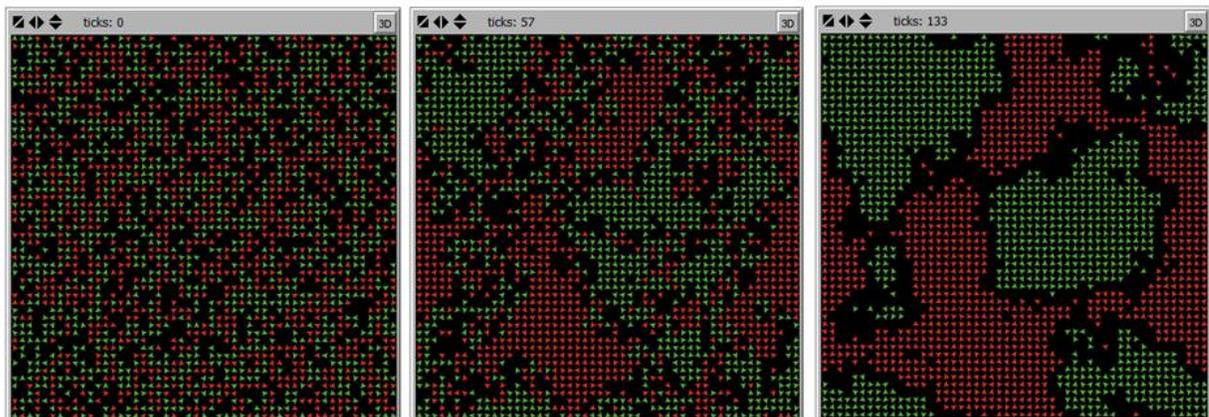
El modelo de segregación de Schelling es una referencia obligatoria para el modelamiento social. Es una de las primeras experiencias en modelación de sistemas multi-agente, en las cuales se le asigna una cierta inteligencia, racionalidad u objetivos a las células, que pasan a representar actores individuales en una sociedad artificial. Con su libro “Micromotivos y macrocomportamientos” (1978) Thomas Schelling consolida lo que venía trabajando desde 1969 en adelante y propone el modelo de segregación residencial según razas.

La interacción en el modelo de segregación de Schelling se desarrolla en un ambiente toroidal representado en una grilla cuadrada en la cual dos razas coexisten, representados por dos tipos de agente en colores distintos, representando dos razas que coexisten en un espacio. En cada celda de la grilla sólo vive un agente y sus vecinos son los ocho puntos que lo rodean, es decir, el modelo utiliza la Vecindad de Moore.

Los agentes tienen un determinado nivel de tolerancia a vivir junto a agentes de un color distinto al de ellos. Por tanto, la regla de comportamiento es que los agentes “se cambiarán de barrio” a cada jugada, si el porcentaje de vecinos de distinto color supera el nivel requerido para sentirse “felices”. Este umbral de tolerancia puede ser definido en cada simulación.

Como se observa en el gráfico, en la jugada inicial (tiempo 0) los agentes rojos y verdes son puestos de modo aleatorio en la grilla, en la cuales también hay espacios en los cuales no habita ningún agente. Con un umbral de tolerancia bastante alto, es decir, se tolera vivir en un barrio con hasta un 70% de agentes distintos, el modelo comienza a operar.

Figura 9 – Evolución de la segregación residencial en el modelo de Schelling (Netlogo)



A las pocas unidades de tiempo en que el modelo comienza a funcionar (57, en el cuadro central), rápidamente se comienza a formar un patrón de segregación. Hacia el tiempo 133, el patrón de segregación ya es evidente y se observan barrios completos de agentes rojos y de agente verdes claramente separados.

Las conclusiones generales del modelo de segregación de Schelling no son evidentes: incluso con niveles de altos de tolerancia individual a vivir junto a personas de una raza distinta, emerge el patrón de segregación residencial. Lo que hizo el modelo de Schelling fue mostrar que en una sociedad de tolerantes

(micromotivos), puede generarse un patrón estructural de segregación racial residencial (macrocomportamientos).

### **3.6.2 El modelo Sugarscape**

Sugarscape es la sociedad artificial que Epstein y Axtell “hacen crecer” desde los agentes, para entender las condiciones bajo las cuales se generan cambios estructurales, someter a confirmación teorías y simular escenarios. Sugarscape es el laboratorio computacional para observar comportamientos macrosociales a partir de reglas de comportamiento individuales. Estos “experimentos teóricos” se llevan a cabo en base a un software, elaborado por los autores, conocido como Ascape. Sin embargo, hay reproducciones del modelo Sugarscape en Netlogo, MASON y otras plataformas.

De este modo, la pregunta fundamental de Sugarscape es la siguiente: “¿Cómo se producen regularidades macroscópicas de fenómenos sociales desde el comportamiento heterogéneo de agentes individuales?”. Una serie de preguntas por diferentes fenómenos sociales como la formación de grupos, migraciones, propagación de enfermedades, guerras, comercio y transmisión cultural, entre otras pueden ser respondidas en base a esta perspectiva bottom up o “desde abajo” de Sugarscape. Las respuestas a estas preguntas –desde la ciencia generativa– se basan en el supuesto base de esta perspectiva. En palabras de los autores: “*Fundamental social structures and group behaviors emerge from the interaction of individual agents operating on artificial environments under rules that place only bounded demands on each agent’s information and computational capacity*”; (“Las estructuras sociales fundamentales y comportamientos grupales emergen de la interacción de agentes individuales operando en ambientes artificiales bajo reglas que imponen demandas limitadas en las capacidades de información y computación de cada agente”). En este sentido, es posible entender un sistema social si uno puede “hacerlo crecer” desde la interacción entre los agentes.

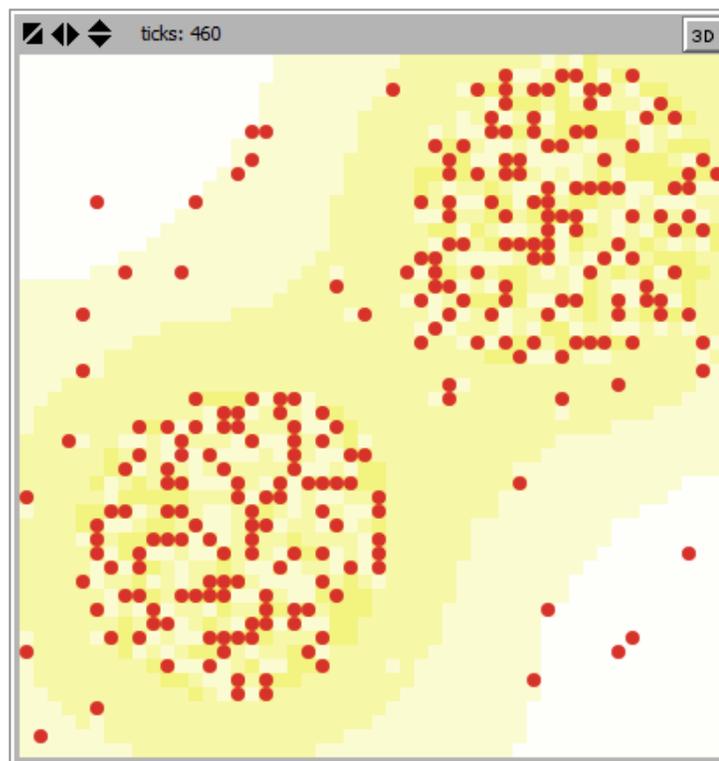
Sugarscape es, por tanto, la plataforma de implementación computacional de un modelo basado en agentes orientado hacia las sociedades artificiales, cuyo objetivo principal es poner a prueba diferentes escenarios relacionados con fenómenos sociales, bajo el supuesto de que si el comportamiento de los individuos sigue reglas específicas, entonces la sociedad concebida macroestructuralmente debe exhibir también algunas propiedades particulares.

El Sugarscape –como muchas otras plataformas de modelos basados en agentes– cuenta con un ambiente, agentes y reglas determinadas como elementos fundamentales. El ambiente de Sugarscape es bidimensional en el cual se mueven los agentes y consiste en una grilla de 50x50 en la cual cada espacio puede ser ocupado por un agente a la vez. Debido a su forma toroidal, el ambiente de Sugarscape permite que los agentes que avanzan más afuera del espacio de la grilla salgan por el otro lado de la misma. En este ambiente existen niveles de azúcar, en tanto recurso natural renovable en distintas proporciones, según sector de la grilla: de ahí el nombre del modelo. En el Sugarscape existen dos regiones con alta disponibilidad de azúcar (Noreste y Suroeste) y dos regiones en la cual esta es escasa (Noroeste y Sureste), generando la idea de montañas y desiertos de azúcar.

Los agentes que viven en el Sugarscape nacen en este mundo con un metabolismo determinado; es decir, con un nivel de consumo de azúcar por unidad de tiempo. Asimismo, pueden adscribirseles otros atributos que variables en la población, de asignación aleatoria. Los agentes tienen también un cierto nivel de visión, que les permite ver –o no ver– las reservas de azúcar para ir a consumirlas. Esta capacidad de visión, en el Sugarscape, sólo es posible según una vecindad de Von Neumann: los agentes sólo pueden ver al norte, sur, este y oeste, pero no de manera diagonal, del mismo modo como se movería una torre en el ajedrez.

En el sistema más básico, por lo tanto, el ambiente se gobierna por un cierto sistema de reglas en conjunción con el sistema de reglas de comportamiento de los agentes. El modelo se puede ir progresivamente complejizando, agregando reglas de comportamiento y también del entorno, según el fenómeno que se desee modelar. En la operación del modelo Sugarscape, los agentes se mueven de casilla en casilla según las siguientes reglas sencillas: En cada unidad de tiempo discreto o tics, cada uno de los agente mira hacia su vecindad de Von Neumann (Norte, Sur, Este y Oeste) hasta donde su visión –aleatoriamente definida– se los permite. En esta observación –de primer orden, si se quiere– encuentran un lugar desocupado con la mayor cantidad de azúcar, optando por el más cercano. De haber dos espacios a la misma distancia y con el mismo nivel de azúcar, la selección es aleatoria.

Figura 10 – El modelo Sugarscape en funcionamiento (Netlogo)



Así, los agentes van hacia el lugar y comen el azúcar. A medida que se va consumiendo, la azúcar vuelve a crecer a una tasa definida y hasta la capacidad de contención de azúcar de cada casilla, según corresponda a un sector de

montaña (hasta cuatro unidades de azúcar) o desierto (cero o una unidad, hacia los faldeos de la montaña). Cada vez que un agente se mueve quema una cantidad de azúcar según su tasa metabólica y en caso de que se les agote el azúcar, los agentes mueren y son removidos del escenario. Si hay regla de reemplazo, un nuevo agente nace aleatoriamente en el Sugarscape.

En la simulación del modelo –con una distribución inicialmente aleatoria de atributos– los agentes rápidamente tienden hacia las montañas de azúcar, especialmente aquellos con una visión más desarrollada o que “nacieron” más cerca de las reservas de azúcar. Muchos mueren en los primeros tics, al estar lejos del azúcar y tener corta visión. Pero un espacio no puede ser ocupado por dos y no todos tienen las mismas condiciones para encontrar azúcar. Por ello, algunos individuos tienden a acumular grandes cantidades de azúcar, generando riqueza personal. Esto ocurre cuando los agentes tienen una mejor visión, por lo que pueden encontrar el recurso a mayor distancia; tienen una menor tasa metabólica, por lo que consumen menos azúcar y pueden sobrevivir más tics en busca del recurso. También tienen más probabilidades de tener más azúcar si han vivido bastante tiempo, lo que les ha permitido mayor acumulación; en caso de morir –si hay regla de reproducción y herencia– sus hijos resultan beneficiados. Unos pocos agentes con corta visión y baja tasa metabólica logran subsistir en las zonas periféricas –es decir, desérticas– del Sugarscape, obteniendo sólo la suficiente cantidad de recursos para sobrevivir pero sin lograr acumular riqueza, lo que genera desigualdad del ingreso a nivel sistémico.

El trabajo de Epstein y Axtell, en síntesis constituye una interesante crítica a los modelos tradicionales y construye un edificio teórico metodológico para el estudio de sociedades con sistemas basados en agentes. El modelo Sugarscape muestra cómo, en base reglas simples de carácter individual, pueden explicarse fenómenos complejos a nivel de sistema social. Del mismo modo, Sugarscape es también una plataforma que permite introducir complejidad creciente en el modelo a partir de nuevas reglas para diferentes escenarios. Finalmente, en las

interacciones de los agentes en base a diversas reglas de comportamiento, puede modelarse la coevolución de fenómenos sociales de carácter demográfico, económico, ecológico, epidemiológico, cultural, normativo y muchos otros. De este modo, el Sugarscape puede reproducir artificialmente una sociedad en tanto sistema complejo, evitando la departamentalización de las ciencias sociales y abriendo grandes posibilidades multidisciplinarias, por medio de la entrada bottom up de los modelos basados en agentes.

### **3.7 El modelo de diseminación cultural de Axelrod**

El modelo de Robert Axelrod de 1997 que reproduce la dinámica de diseminación cultural no sólo es uno de los modelos clásicos en ciencia generativa, sino que también es suficientemente modular y está diseñado para la introducción progresiva de nuevas condiciones de modo que contribuya a responder nuevas preguntas a través de un modelo validado. Esto permite mayor acumulación en el conocimiento de los sistemas sociales complejos evolutivos.

#### ***3.7.1 Una re-lectura luhmanniana del modelo de Axelrod***

Para la presente investigación, el modelo de diseminación cultural de Axelrod constituye el edificio teórico y de programación computacional sobre el cuál es posible introducir las condiciones de probabilidad diferenciada de interacción comunicativa. En esta investigación, además, se procede considerando que el sistema de comunicaciones modelado por Axelrod es isomórfico en varios niveles respecto de la visión luhmanniana de la sociedad como sistema de comunicaciones.

La pregunta central de Axelrod es cómo se mantienen las diferencias culturales, pesar de la tendencia a la convergencia. Es decir, bajo el supuesto de que a mayor similitud, mayor interacción y mayor convergencia cultural, cómo es que no se converge a una homogeneidad total, sino que la convergencia local genera polarización global. Una de las innovaciones más importantes es que Axelrod considera múltiples atributos culturales en su concepto de cultura, que podrían ser

consideradas como un “set de distinciones” inespecíficas y susceptibles a la influencia social. La formalización de Axelrod simula lo que podría llamarse una semántica o una estructura de expectativas que puede transmitirse y estabilizarse, si se formulara en el lenguaje luhmanniano.

Del mismo modo, el mecanismo estudiado por Axelrod tiene ciertos elementos en común con la visión luhmanniana de la doble contingencia, en la medida que no es necesario compartir la totalidad de las distinciones en una semántica. Para Axelrod, la similitud incrementa la interacción, que a su vez incrementa convergencia, sin necesidad de un trasfondo cultural compartido completo. Basta un mínimo de similitud para generar interacción y luego, con una cierta probabilidad, se produce la transmisión cultural por medio de un mecanismo imitativo que sólo produce cambios al interior del sistema que inicia la interacción. De este modo, puede decirse que los sitios culturales de Axelrod funcionan como unidades autopoieticas, ya que dependen de sus propias condiciones para el cambio de estado.

Axelrod termina explicando por qué se detiene la tendencia a la convergencia hasta antes de que sea total, planteando una serie de otras preguntas que se pueden hacer con su modelo, incluyendo la probabilidad diferenciada de interacción. Hasta el momento, aunque ya ha habido extensiones del modelo, ninguna ha considerado la probabilidad diferenciada de interacción la latitud como factor ecológico de probabilización e improbabilización de la comunicación. El autor señala que su modelo es complementario con otros mecanismos y no agota el problema de la diseminación cultural, por lo que deja la puerta abierta para extensiones.

### ***3.7.2 Los fundamentos del modelo de diseminación de Axelrod***

Axelrod constata que existen mecanismos que facilitan la convergencia y homogeneización cultural, entre los cuales menciona una serie de hechos que dan cuenta de aquello. Por ejemplo, la formación de estados se facilita con hábitos

comunicativos compartidos, aunque los conflictos de secesión persisten incluso en estados constituidos. Menciona también que la convergencia cultural se acelera con la integración transnacional por medio de acuerdos, constituciones comunes y organismos internacionales, entre otros fenómenos. Sin embargo, también se constatan procesos de auto-diferenciación social que promoverían la heterogeneidad cultural, como la evitación de la imitación y las modas diferenciadoras, la preferencia por las visiones extremas, la especialización, los cambios ambientales y tecnológicos, el aislamiento geográfico, así como la deriva y cambios aleatorios.

Ninguna de las explicaciones que Axelrod analiza considera que la transferencia de ideas se produce entre individuos similares culturalmente, lo que había sido ampliamente documentado en la literatura que él revisa. Sin embargo, que lo similar genere mayor similitud por medio de la interacción no llevaría a la convergencia total, sino a la generación de zonas culturales homogéneas y estables dependiendo de las posibilidades de configuración cultural, el rango de las interacciones y el tamaño del territorio

Reconociendo que hay centenares de definiciones distintas de cultura, muchas de las cuales son visiones antropológicas abstractas de difícil investigación sistemática o bien que enfatizan sólo un aspecto de la complejidad que significa el fenómeno de la cultura, Axelrod prefiere –como lo hacen también Collar y Foley (2002)– utilizar un concepto operativo de cultura. El autor entiende a la cultura como un set de atributos transmisibles asociados a la experiencia de la interacción, cuya transmisibilidad aumenta en la medida que los actores sociales son más parecidos e interactúan en mayor medida. Bajo estos supuestos, Axelrod emprende la tarea de modelar por medio de técnicas basadas en agentes un sistema comunicacional complejo, sin autoridad central, compuesto de agentes adaptativos más que racionales.

La cultura es entonces un conjunto de atributos influenciados socialmente, formalizado en “n” dimensiones (que simbolizan algún atributo cultural como el lenguaje, las creencias, etc.) y “k” rasgos por dimensión (que especifican distinciones en los atributos, como la lengua española, la creencia en el cristianismo, etc.). Una cultura es formalizada en un vector de una serie de números (en el modelo estándar, 5 dígitos), según lo cual la cultura 25412 es similar a 25466 en un 60% en la medida que tres de 5 características son compartidas. Por otra parte, 25412 es 0% similar a 78999, por lo que ninguna interacción es posible entre estas culturas.

Estos agentes interactúan en una grilla cuadrada no toroidal (al menos en el modelo estándar), que puede cambiar su tamaño (incrementando o reduciendo el 10x10 del modelo estándar). Los agentes interactúan según la Vecindad de Von Neumann, que es ortogonal y sólo considera a sus vecinos en el Norte, Sur, Este y Oeste. La probabilidad de interacción es homogénea en toda la grilla y está dada por las condiciones internas de cada uno de los pares de agentes que interactúan.

Tabla 3 – Ejemplo de condición inicial del modelo de diseminación cultural en grilla 10x10, 5 dimensiones y 10 rasgos

37254	42614	86959	18378	82226	32766	88809	29334	23676	63159
48900	88886	53367	90594	61527	11774	16169	95559	47482	48268
99983	20643	51322	28598	40060	32352	88638	48956	40372	43721
48856	76041	82790	37732	81073	15760	16840	82987	12593	21297
37562	23351	43213	89401	28316	12647	33293	59505	49925	28895
81938	49211	96355	25848	85589	72768	46756	28124	41727	94716
65435	44024	90397	99934	55221	15164	19107	51920	45660	80404
56571	28175	73700	82867	64453	31128	60063	19579	25620	86197
75336	49488	73787	90620	75727	36242	57963	74069	45010	55434
25943	57756	64155	49524	78246	18959	50652	91064	57007	37126

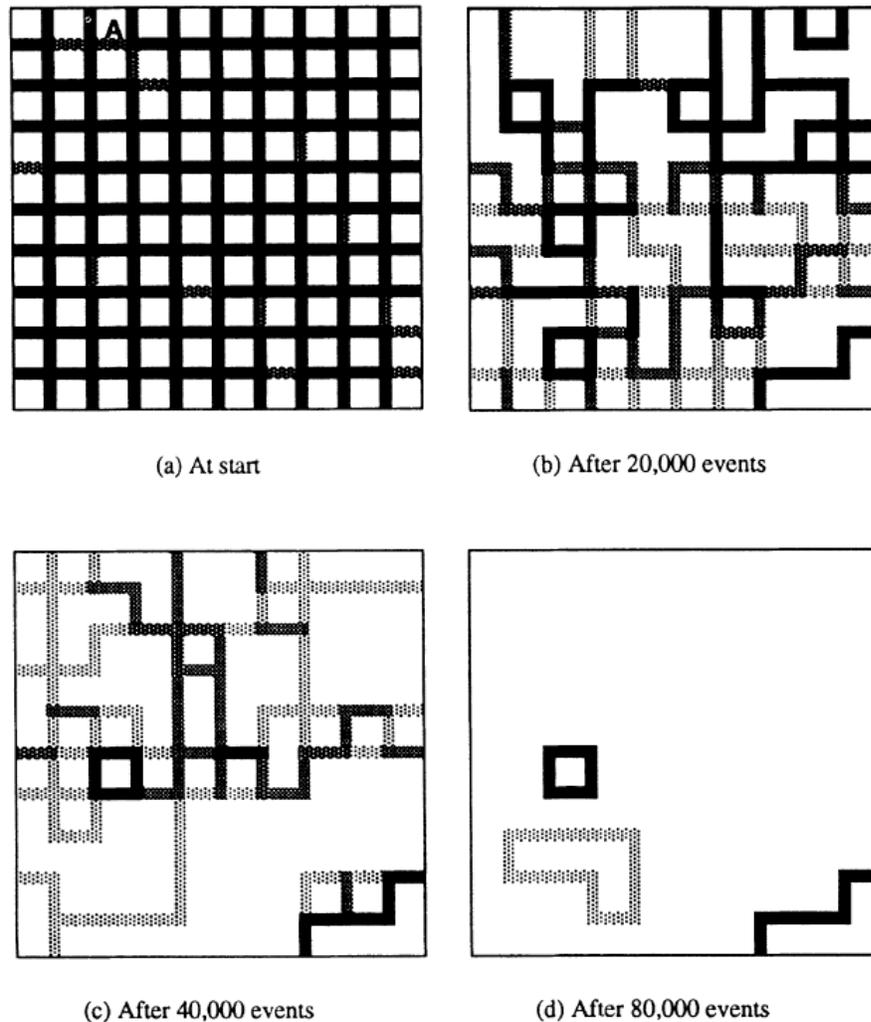
En la grilla de ejemplo, se selecciona la cultura indicada en una celda coloreada (73700) y se selecciona su vecino del sur (73787). Se observa que los vecinos comparten tres dimensiones de cinco en total, es decir, son similares en un 60% y según esa probabilidad interactuarán comunicativamente. El efecto de la interacción es que el vecino seleccionado inicialmente asume, iguala o imita un

rasgo del vecino con que interactúa (manteniendo la difusión como un proceso interno en el agente). De este modo, para la jugada siguiente, este par de vecinos serán 80% similares y tendrán más probabilidad de interactuar en el futuro.

Por tanto, el funcionamiento general del modelo es el siguiente: en el primer paso, el modelo elige al azar un sitio y un vecino de ese sitio también al azar. Con la probabilidad proporcional a su similitud, los vecinos interactúan. En el caso de resultar favorable la interacción, el vecino que inició la interacción iguala o imita una de los rasgos en alguna dimensión. De este modo, se incrementa la similitud entre tales vecinos y aumentando también su probabilidad de convergencia futura. Si los vecinos seleccionados son iguales entre sí, la interacción no tiene efectos prácticos porque no hay nada que imitar.

El modelo itera según esta secuencia hasta que se estabiliza: se detiene cuando ninguna cultura puede interactuar con otra, ya sea porque son todos iguales o porque no todos totalmente distintos y la probabilidad de interacción es cero. En la figura a continuación, se presenta una jugada del modelo detenida en momentos del tiempo cada 20.000 turnos, en la que se evidencia la tendencia hacia la convergencia –no total– de las culturas:

Figura 11 – Evolución del modelo de diseminación cultural de Axelrod (1997) en momentos cada 20.000 iteraciones



**Figure 1: Map of Cultural Similarities**

NOTE: Cultural similarity between adjacent sites is coded as black  $\leq$  20%, dark gray = 40%, gray = 60%, light gray = 80%, white = 100%. This run was conducted using five cultural features and 10 traits per feature, using the initial conditions shown in Table 1. Each interior site has four neighbors.

En la visualización del modelo, las disimilitudes culturales se representan con fronteras de color negro, que indica que los agentes separados por esa frontera comparten un máximo de un atributo de los cinco del modelo estándar. A medida que se hacen más grises y desaparecen, indicando aumento de la similitud.

La gran heterogeneidad inicial comienza a reducirse con la interacción progresiva ya a los 20 mil eventos o unidades de tiempo discretas, también llamados tics. En

40 mil y 80 mil unidades de tiempo los rasgos culturales comienzan a ser compartidos en áreas cada vez más grandes hasta que, eventualmente, se elimina la probabilidad de cambio, ya que los pares idénticos no pueden compartir más rasgos y los pares completamente disímiles no interactúan. En promedio, se produce la estabilización en tres áreas culturales, aunque con alta dispersión: en 14% de las jugadas sólo quedó una región y en el 10% quedaron más de seis regiones culturales estabilizadas, cuyos orígenes pueden ser rastreados hacia los primeros momentos del modelo.

Con este modelo, Axelrod genera algunos resultados esperables: una vecindad ampliada acelera y amplía el proceso de convergencia y, por otro lado, un mayor número de rasgos por atributo permite mayor probabilidad de tener rasgos compartidos. Sin embargo, los resultados más interesantes no son aquellos derivables del sentido común: son aquellos resultados impredecibles a los que sólo se puede llegar por medio de la simulación. Axelrod muestra que la intuición no predice bien el comportamiento de los sistemas complejos dinámicos, incluso los más simples. El autor encuentra entre los resultados contra-intuitivos confirmados que el número de regiones estables –cuyo aumento indica convergencia– disminuye a medida que aumentan los atributos o dimensiones culturales, al tiempo que disminuye con territorios más grandes, sobre 20x20.

Por ello, Axelrod discute que dos aspectos de la complejidad cultural operan en direcciones opuestas: más atributos culturales (religión, idioma, etc.) generan menos áreas culturales estables y menor convergencia cultural, mientras más rasgos por atributos (cristianismo, español, etc.) genera más áreas estables y mayor convergencia cultural, lo que evidentemente no podía ser deducido de la formulación teórica del problema. No se requirió una explicación funcionalista o una explicación evolucionista por adaptación para reproducir la difusión cultural e incluso si no hay una ventaja comparativa en una forma cultural, ésta es vulnerable a las fluctuaciones azarosas en el modelo de influencia social.

Finalmente, la polarización global ocurre incluso si la única tendencia es hacia la convergencia local, no por una tendencia a la polarización.

Axelrod propone una serie de extensiones del Modelo, por ejemplo, la introducción de deriva cultural que explore los efectos de cambios aleatorios, del algún atractivo cultural en la forma de rasgos más probables de transmitir, modelar el cambio tecnológico por medio de la introducción continua de rasgos más atractivos, relacionar la interacción entre el atractivo de un rasgo y el terreno, indagar en los efectos de la educación pública y teledifusión, movilidad, cultura organizacional, divergencia cultural, etc. Explicita también la posibilidad de explorar los efectos del terreno en la forma de reducción de probabilidad de interacción en ciertos sitios adyacentes, como es el objetivo de esta tesis.

Hasta el momento, las extensiones del modelo realizadas incluyen críticas la transmisión por similitud, han introducido la regla de que los vecinos copian al mejor modelo, han descubierto que sobre un umbral, la diversidad inicial evita la monoculturización y que los medios de comunicación global causan una aceleración de la convergencia y, lo que es muy importante para la teoría de la complejidad, en la fase de transición de desorden al orden ocurre una distribución según la ley de poder, característica típica de los fenómenos complejos.

Ningún modelo, dentro de la literatura que se pudo revisar, intentaba indagar respecto de la probabilidad diferenciada de interacción y en sus efectos sobre el gradiente latitudinal de diversidad cultural. El modelo de Axelrod, por tanto, puede ser generalizado introduciendo esta probabilidad diferenciada, para lo cual la programación debe ser intervenida en gran medida para generar los procesos y resultados esperados.

## **4 OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

Esta tesis se hace una pregunta fundamentalmente teórica al indagar respecto de cuáles son los efectos de la probabilidad diferenciada de comunicación en las estructuras macrosociales. Para ello, se utiliza como escenario de investigación el fenómeno del patrón geográfico –gradiente latitudinal– de diversidad cultural, con el objetivo de explicar cómo la generación del mismo depende de las condiciones diferenciadas en la probabilidad de interacción comunicativa. En términos formales, los objetivos e hipótesis de esta investigación son los siguientes:

### **4.1 Objetivo general**

Estudiar la relación entre la densidad comunicacional y la diferenciación socio-cultural en contextos sociales estructuralmente acoplados con el ambiente mediante un modelo basado en agentes.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Construir un modelo basado en agentes que permita generar/reproducir el gradiente latitudinal global de diversidad cultural en función de la relación ecológica entre ambiente y sociedad.
- Evaluar la influencia de la disposición diferenciada a la interacción según latitud en la reproducción del gradiente geográfico de diversidad cultural.
- Comparar los resultados del modelo con los análisis de previos de la diversidad cultural por medio de técnicas de modelamiento basado en agentes.

### **4.3 Hipótesis general**

El patrón geográfico de diversidad cultural se explica, según el paradigma de la ciencia generativa– por la relación ecológica entre las condiciones ambientales diferenciadas por latitud y la probabilidad de interacción entre culturas. A menor latitud, se reduce la probabilidad de la interacción y la densidad comunicacional, incrementándose la diversidad cultural. Esto implica, en términos teóricos, que una mayor densidad comunicativa –cantidad de interacciones– favorece la convergencia cultural.

### **4.4 Hipótesis específicas**

- La diversidad cultural en condiciones diferenciadas de densidad comunicacional disminuye con el aumento de la probabilidad de interacción.
- La relación entre la probabilidad de interacción comunicativa y el gradiente latitudinal de diversidad cultural –al constituir un sistema social complejo– presenta un comportamiento no lineal.
- Existe una correspondencia entre el modelo de diseminación cultural de Axelrod (1997) cuando la disposición diferenciada a la interacción tiende a cero.

## 5 METODOLOGÍA

Para estudiar la relación entre la densidad comunicacional y la diferenciación socio-cultural en contextos sociales estructuralmente acoplados con el ambiente se construirá un modelo basado en agentes para la simulación de diversos escenarios. Se procederá utilizando elementos de la teoría social basada en la comunicación de Luhmann combinándolos con la perspectiva de la ciencia generativa. Se modificará el modelo de diseminación de Axelrod para incorporarle la probabilidad diferenciada de interacción comunicativa. Posteriormente, se diseñarán experimentos computacionales que permitan poner a prueba las hipótesis de investigación.

Aunque los criterios clásicos de la investigación desde el paradigma post-positivista no son aplicables acríticamente a la ciencia generativa, es posible decir que la presente investigación es de carácter explicativo, en la medida que pretende exponer los mecanismos de emergencia y estabilización de los patrones globales de diversidad cultural; además, la investigación sería experimental, ya que se realiza un control de variables en el laboratorio computacional, pero los grupos de control se establecerían en la simulación y comparación de escenarios posibles de interacción local de agentes.

Debido a que la presente investigación –y en general, la modelación computacional– requiere la convergencia de conocimientos desde distintas disciplinas, se ha establecido un equipo multidisciplinario de investigación para la generación del modelo basado en agentes. En este equipo interdisciplinario participan miembros del Instituto de Filosofía y Ciencias de la Complejidad (IFICC). En base a reuniones de trabajo semanales y presentaciones de avance en el Grupo de modelamiento en Ciencias Sociales del IFICC, el equipo ha desarrollado un modelo multi-agente que reproduce las condiciones teóricamente descritas tanto en la literatura sobre el patrón latitudinal de diversidad cultural como en el modelo de diseminación cultural de Axelrod (1997).

Respecto de la transferencia de las condiciones teóricas a la programación del modelo, la interacción local entre los agentes considera el problema de la doble contingencia, en la medida que la comunicación entre agentes no es mecánica y, de hecho, es improbable, en la medida que la constitución de un grupo involucra la interacción contingente de los dos agentes, en un proceso selectivo no mecánico. Estos procesos de doble contingencia se repiten en cada iteración, en condiciones análogas a las de la complejidad que caracteriza a la sociedad humana.

Respecto de la emergencia del patrón de distribución documentado en la literatura, en la medida que una proporción mayor de culturas –en grupos de menor tamaño en la zona del ecuador, donde hay mayor productividad primaria y mayor concentración de patógenos y, hacia los polos, los grupos sean más grandes, será posible considerar que las reglas individuales y los factores ecológicos y sociales que generaron la auto-organización de un sistema análogo a la realidad. Si bien no es relevante el mecanismo específico –patógenos, productividad primaria u otro– lo relevante teóricamente es el efecto diferenciado en la probabilidad de que los sitios culturales interactúen. En esta medida, el modelo explicaría el patrón global de distribución de la diversidad cultural por medio de la introducción de probabilidad diferenciada de interacción.

### **5.1 Paradigma epistemológico**

La presente investigación intenta combinar la perspectiva de la sociedad como sistema complejo evolutivo y probabilístico constituido fundamentalmente de comunicaciones (Luhmann, 2007) y la ciencia generativa (Axtel y Epstein, 1996; Epstein 1999), que entiende los fenómenos sociales emergentes como resultantes de la evolución de interacciones entre agentes. De este modo, se intenta dotar a la teoría luhmanniana de un soporte metodológico para formular y responder preguntas de modo empírico por medio de la simulación computacional.

La utilización de un modelo en base a agentes permite simular –en un laboratorio computacional– fenómenos sociales que no son posibles de reproducir en un

trabajo de campo tradicional. Por ello, epistemológicamente, el modelamiento en base a agentes ocupa un lugar intermedio entre la deducción teórica y la inducción empírica, asumiendo una posición de realismo débil cercano al constructivismo (Phan & Varene, 2010) en la medida que se propone una analogía entre las condiciones del modelo y las condiciones de la realidad. Entre otras ventajas, esto permite soslayar las dificultades éticas propias de la investigación social tradicional con seres humanos.

Respecto de la elaboración del modelo, se procede según la metodología de construcción progresiva de modelos metodología de construcción y mejoramiento progresivo de modelos matemáticos y computacionales (Cioffi-Revilla, 2010), que indica que debe procederse desde un “modelo 0” o inicial de modo gradual a un modelo final. La presente tesis documenta la elaboración y análisis del modelo 0, esbozando conclusiones con simulaciones preliminares y sin referencia explícita a las estructuras observadas ni comparación con datos reales. La realización de trabajos más profundos en esta línea permitirá una mejor calibración del modelo con los datos empíricos y la simulación de escenarios más complejos y más realistas, así como el mejoramiento de las condiciones actuales de modelación y simulación.

Hay una serie de ventajas que hacen de modelamiento basado en agentes una buena alternativa para representar y explorar el comportamiento de sistemas complejos evolutivos, como los sistemas comunicacionales. Algunas ventajas son las siguientes:

- Los lenguajes de programación son más expresivos y menos abstractos que otros formalismos matemáticos. En muchos casos, los modelos basados en agentes presentan sus resultados de modo visual, haciendo más fácil e intuitiva su interpretación.
- Representan mejor procesos paralelos y procesos sin orden específico de las acciones, por lo que son apropiados para representar procesos no lineales y de interacción múltiple simultánea.

- Son modulares y pueden modificarse con facilidad para representar distintos sistemas. Del mismo modo, modelos prediseñados pueden ser modificados para incorporar nuevas condiciones que se desee poner a prueba.
- Abordan mejor la heterogeneidad de los agentes, considerando la posición relativa y las condiciones específicas de cada uno de los agentes respecto del resto de los agentes y en un ambiente determinado en cada iteración.
- Los modelos basados en agentes pueden representar cambios en los agentes, otorgando mayor realismo. Por ejemplo, pueden representar ciclos de vida, muertes, decisiones inesperadas, etc.
- Pueden expresar racionalidades limitadas, restricciones de información, actitudes, etc.
- Pueden representar sistemas fuera del equilibrio.

## **5.2 Tipo de estudio**

Esta investigación procedió por medio de una metodología de reciente incorporación en ciencias sociales: el modelamiento matemático-computacional de fenómenos sociales complejos. Por ello, las distinciones tradicionales de estudios cualitativos o cuantitativos, transversales o longitudinales, experimentales o no experimentales, entre otras, deben ser redefinidas.

La presente investigación es de tipo semi-cuantitativo, ya que si bien se utilizan datos numéricos para indicar magnitudes, distribuciones y variaciones, éstas no pretenden dar cuenta de aquellas medidas en la realidad empírica. La investigación, sin embargo, proyecta obtener resultados de carácter cualitativo respecto de la relación entre la probabilidad de interacción y la convergencia o divergencia cultural.

Respecto de la forma de trabajo y el control de variables, esta investigación es de carácter matemático-experimental: la definición de los atributos, condiciones y procesos que se estudiarán son formulados matemáticamente y formalizados en

términos o de ecuaciones compuestas por variables que pueden tomar diversos valores, tanto continuos como discretos. El carácter experimental del estudio viene dado por la simulación de diversas condiciones variando los valores de las variables cruciales –la probabilidad de interacción según las condiciones ecológicas– manteniendo constantes otros parámetros en el modelo. Asimismo, se incorporan variables aleatorias en el funcionamiento del modelo que impiden la atribución trivial de sus resultados a los parámetros establecidos. De todos modos, el sentido de experimental de esta investigación está enmarcado en la concepción del

En términos del espacio temporal que se investiga, esta investigación es de carácter dinámico-longitudinal, en la medida que el modelo de simulación reproduce la dinámica de interacciones de modo sucesivo. Esto implica que cada uno de los momentos de tiempo discreto en las que itera el modelo depende de las condiciones anteriores. En este sentido, el modelo de probabilidad de interacción representa la evolución cultural desde un inicio teórico hasta su estabilización.

### **5.3 Técnicas de Investigación**

La técnica fundamental utilizada en esta investigación es el modelamiento basado en agentes (MBA), también llamada modelamiento y simulación basada en agentes (MSBA) o modelos multi-agente (MMA). Esta técnica de investigación permite representar y conocer condiciones de funcionamiento de sistemas no lineales, complejos y adaptativos, resultantes de la interacción de entidades de simulación denominadas agentes. La interacción entre agentes –con propiedades *elementales* a nivel de individuos, organizaciones, subculturas u otra unidad que se considera elemental– generan o hacen emerger estructuras macrosociales o propiedades *emergentes* de los sistemas sociales complejos (Srblinovic y Skunca, 2003).

Como técnica de investigación, la construcción del modelo requiere –para pasar a constituir un “laboratorio computacional”– de ser programado y operacionalizado en un software, de modo de realizar simulaciones. La simulación permite, mediante la formulación matemática formalizada de las relaciones entre las partes del sistema social en un programa computacional, de modo de reproducir su funcionamiento en largos períodos y permitir describir su comportamiento en condiciones distintas. Esto permite atribuir el comportamiento del sistema real a las condiciones impuestas en el sistema simulado, en la medida que se cumplan ciertas condiciones de verificación y validación. La aplicación de estas técnicas a la indagación sobre fenómenos sociales también se conoce como sociología computacional.

En modelamiento matemático computacional existen tres alternativas para responder a las preguntas sobre fenómenos sociales. La primera alternativa es tomar un modelo elaborado previamente y variar los parámetros incluidos en el mismo de modo y diseñar sobre ese escenario un experimento para responder a la pregunta de investigación. Esta alternativa tiene la limitación de no poder incorporar aspectos que no estuvieran considerados en la programación inicial.

La segunda alternativa es la modificación de un modelo previamente construido. En caso de contarse con un modelo –en la medida de lo posible validado– el investigador puede intervenir el modelo para incorporarle alguna condición o aspecto de su interés. Así, con una plataforma previa, isomórfica respecto del sistema objetivo que el investigador desea modelar, puede generarse un modelo modificado para responder nuevas preguntas de investigación.

La tercera alternativa, que requiere mayores conocimientos en programación, es más arriesgada en términos teóricos-metodológicos y necesita pasar por más filtros de validación, es construir un modelo desde cero. Construir un modelo desde cero, sin embargo, permite ser mucho más preciso respecto del sistema

que se desea modelar, ya que no es necesario asumir los supuestos de otras investigaciones.

El software Netlogo, con el que se trabaja en esta tesis, permite iniciar la construcción de modelos desde cero, modificar la programación de modelos prediseñados o bien, sencillamente modificar parámetros de modelos previos.

Para la construcción del modelo del sistema de interacciones comunicativas de probabilidad diferenciada se procedió mediante la investigación bibliográfica tanto teórica como empírica en la materia, la reflexión teórica y la formalización matemática del modelo, para después proceder a programarlo en el software Netlogo 4.3.1. La construcción de este modelo se hizo siguiendo el ejemplo y luego modificando el modelo de diseminación cultural de Axelrod de 1997, al cual se le incorporaron modificaciones para introducir la probabilidad diferenciada de interacción comunicativa entre sitios culturales.

El modelo basado en agentes genera información cuantitativa que es posteriormente analizada por medio de estadística descriptiva de los resultados de las simulaciones (frecuencias absolutas y relativas, medidas de tendencia central y medidas de dispersión). Adicionalmente, se utiliza la técnica estadística inferencial análisis de regresión lineal basada en el método de los mínimos cuadrados ordinarios, para establecer la relación entre la probabilidad de interacción y el gradiente latitudinal de diversidad cultural.

#### **5.4 Limitaciones de la investigación**

La presente tesis reconoce una serie de limitaciones, algunas comunes a todos los intentos de modelamiento social debido al estado del arte disciplinario y otras debido a las condiciones específicas de esta investigación, asociadas fundamentalmente a las limitaciones en la capacidad de procesamiento computacional y a que se trata de un modelo en la etapa inicial de su desarrollo.

#### **5.4.1 Limitaciones de los modelos basados en agentes**

Si bien la utilización de modelos basados en agentes ofrece una serie de ventajas para la generación de conocimiento respecto de sistemas sociales complejos, la introducción de esta forma de ciencia es relativamente nueva a nivel mundial y muy escasamente explorada a nivel nacional. Por ello, esta investigación comparte con otras investigaciones de este tipo varias de las limitaciones atribuibles al estado del arte de la disciplina. Algunas de estas limitaciones son las siguientes:

Por una parte, permiten proporcionar mecanismos explicativos de nivel general más que realizar predicciones específicas, por su baja exactitud. Por lo tanto, los modelos de carácter más simple en general se limitan a la reproducción de fenómenos de carácter general, a la explicación de mecanismos y patrones en la generación de macro-regularidades, pero no aún a la predicción a nivel particular.

Los modelos de simulación sufren de “opacidad explicativa”. Esto significa que sus resultados no son siempre evidentes ni hay garantías inmediatas de representación del fenómeno. Por lo tanto, una vez simulado el modelo, es teóricamente difícil retornar con los datos a la teoría. En este sentido, muchas veces es difícil distinguir si el modelo es sólo un artificio o sus resultados son significativos para interpretar sistemas reales.

Ya que el desarrollo de la simulación computacional en ciencias sociales es reciente, aún las formas de validación no están totalmente estandarizadas ni son de uso habitual en todos los trabajos de este tipo. Del mismo modo, no hay aún un protocolo extendido y reconocido por la comunidad científica para ello. Debido al estado del arte de la disciplina del modelamiento matemático-computacional en ciencias sociales, aún es difícil balancear adecuadamente los requisitos de verosimilitud y simplicidad en la construcción de modelos: a medida que el modelo se hace más parecido a al sistema que se desea modelar y gana realismo, pierde la parsimonia que permite la interpretación científica generalizadora. No hay

estándares establecidos respecto del nivel adecuado de complejidad que debe incorporarse en un modelo y en general cada investigación resuelve esto según sus propias condiciones y objetivos. En la actualidad se avanza hacia modelos cada vez complejos y realistas, a medida que avanza también la capacidad de computación de datos.

#### **5.4.2 Limitaciones de la presente investigación**

La presente investigación reconoce algunas limitaciones, algunas de las cuales podrán ser subsanadas en versiones para la publicación. Sin embargo, respecto del presente documento, es necesario considerar que una serie de limitaciones.

El modelo de probabilidad diferenciada de interacción es el “modelo cero”, según la metodología de Cioffi-Revilla (2010) y en ningún caso un modelo final. Por lo tanto corresponde a una versión inicial susceptible de mejorar en su formulación, en su formalización matemática y en su programación. Para la versión de esta investigación en formato de artículo de revista científica, se espera revisar el modelo y hacer modificaciones si es pertinente.

Por otra parte, existen algunas metodologías de validación de los modelos que, si bien no constituyen aún un estándar en la ciencia generativa, permitirían incrementar la validez del mismo, mejorar su confiabilidad y verificar su robustez. Por el momento, sólo se procede por medio de la metodología del “grounding” (Srblinovic y Skunca, 2003), que dice relación con la especificación y justificación de los supuestos del mismo.

Aunque el problema que intenta resolver el presente modelo es eminentemente teórico y dice relación con los efectos de la probabilidad diferenciada de interacción, futuras extensiones del modelo podrían volver sobre los fundamentos empíricos del patrón geográfico latitudinal de diversidad cultural. De este modo, podría verificarse la vinculación del modelo incorporándole datos empíricos, de

modo de contribuir a la discusión empírica de la ecología cultural respecto de la explicación del gradiente.

El modelo es también susceptible de ser calibrado con datos reales, tarea que no fue desarrollada en el marco de este documento. Esto permitiría que –una vez validado en términos formales– pudieran reproducirse condiciones de evolución de la diversidad cultural con probabilidad diferenciada atendiendo a parámetros de casos reales, abriendo la posibilidad incluso de predicción de fenómenos sociales.

Las limitaciones de tiempo y de capacidad de procesamiento de datos impidieron que pudieran desarrollarse otros experimentos, simulando condiciones diferenciadas según la complejidad social según rasgos y dimensiones de las culturas a modelar, variando el tamaño del territorio y estableciendo diversas formas de vecindades. Debido a que una simulación computacional toma varios días de procesamiento ininterrumpido en concluirse, esta investigación se limita a analizar el experimento fundamental de la probabilidad de interacción diferenciada, dejando la variación de otros parámetros para futuras investigaciones.

## **6 EL MODELO DE PROBABILIDAD DIFERENCIADA DE INTERACCIÓN**

Esta tesis se desarrollará por medio de la adaptación del modelo de diseminación cultural para incorporarle la probabilidad diferenciada de interacción según la posición relativa de los agentes en la grilla, dada por la introducción de un gradiente latitudinal. En este capítulo, se describen los procesos y procedimientos de modificación del modelo pre-elaborado, detallando los cambios que se aplicaron a sus elementos: ambiente, agentes y reglas.

### **6.1 La versión del modelo prediseñado de Axelrod en Netlogo**

El producto central de la siguiente investigación –y a la vez la herramienta de investigación para producir los resultados– es la elaboración de un modelo matemático-computacional que reproduzca una sociedad artificial de agentes culturales en interacción diferenciada según la latitud en la que se encuentren.

Como se detalló en el marco teórico, el modelo estándar de diseminación cultural de Axelrod descrito en el artículo “The Dissemination of Culture: A Model with Local Convergence and Global Polarization”, opera en una grilla cuadrada de 10x10 en la que 100 sitios culturales –caracterizados por un vector de dimensiones y rasgos culturales en números enteros– interactúan según los siguientes procedimientos:

1. Se elige un sitio activo al azar.
2. Se elige un vecino pasivo al azar.
3. Los sitios interactúan en la misma probabilidad que su similitud
4. Si hay interacción, el sitio activo copia uno de los rasgos del pasivo

El modelo acaba cuando no pueden producirse más interacciones, en la medida que todos los sitios sean iguales o bien, que los sitios diverjan en la totalidad de sus rasgos, por lo que la interacción tendría probabilidad 0. El modelo visualiza la homogeneidad y la heterogeneidad según una escala de grises de cinco posiciones entre negro y blanco, representando total diferencia cultural y total similitud cultural respectivamente.

El modelo de Axelrod puede ser modificado para representar la probabilidad diferenciada de interacción, que según los antecedentes según el marco teórico de esta investigación, tenderán a generar patrones distintos de convergencia y divergencia cultural. En esta investigación, se tomó la reproducción del modelo de Axelrod en la versión realizada por I.S. Weaver y D.J. Raine (2010), programado en Netlogo y disponible como archivo descargable en la comunidad de usuarios de Netlogo (<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/community/>). Esta versión del modelo de Axelrod se programa en base a 177 líneas de código, por lo que es un modelo relativamente sencillo. Para su modificación en el marco de esta tesis, en cambio, el nuevo programa alcanzó las 436 líneas de código, por lo que el modelo resultó bastante más complejo. Otras versiones del modelo de Axelrod pueden ser encontradas en la comunidad de usuarios y también en Vivanco (2010).

## **6.2 Elementos del modelo de probabilidad diferenciada de interacción**

El Modelo de Probabilidad Diferenciada de Interacción propuesto en esta tesis es una adaptación del modelo de diseminación cultural de Axelrod en la versión programada por Weaver y Raines (2010), para introducirle una probabilidad diferenciada de interacción comunicativa entre culturas según la latitud en que los agentes o sitios culturales se encuentren.

En el modelo se mantienen una serie de elementos del modelo estándar de Axelrod. Aunque en la versión de Axelrod la topología de la grilla es cuadrada, en la versión de Weaver y Raines (en Netlogo) tiene forma toroidal. Este cambio respecto del modelo original –probablemente– se debe a una dificultad de programación, ya que en el proceso de modificación del modelo se intentó establecer una grilla cilíndrica (como debería ser representado un mundo con latitud y ecuador), el programa arrojó un error informático que no pudo ser resuelto. De todos modos, en su artículo de 1997, Axelrod prueba su modelo con una grilla toroidal y encuentra resultados robustos.

En el modelo adaptado de probabilidad diferenciada de interacción los agentes permanecen inalterados. En ambos casos, los agentes se caracterizan por un vector de  $d$  dimensiones y  $r$  rasgos culturales, que en la versión estándar de los dos modelos  $d=5$  y  $r=10$ . Aunque la variación de estos indicadores de complejidad de los sistemas socioculturales es relevante para la investigación de Axelrod, en este documento se mantendrán inalterados y no se harán experimentos al respecto, ya que por limitaciones a la capacidad de procesamiento esto excede las posibilidades de esta tesis.

Aunque los agentes no cambien, las reglas del comportamiento de los mismos sí deben cambiar para hacerlos sensibles a las nuevas condiciones de probabilidad diferenciada de interacción determinada latitudinalmente. Para hacer los experimentos, la probabilidad de interacción diferenciada podrá ser modulada en el modelo por medio de lo que se ha denominado el “peso específico del factor ecológico”, que en la medida que se iguale a 0, se espera que tienda a reproducir los resultados de Axelrod (el modelo no describirá ningún patrón latitudinal sistemático).

A continuación, se detallan los procedimientos de re-construcción y adaptación del modelo, para incorporarle la probabilidad diferenciada de interacción.

### **6.2.1 Ambiente**

La grilla del modelo adaptado tiene dimensiones parecidas al modelo de Axelrod, pero se le agregaron dos filas y dos columnas más, de modo de dejar en el centro una línea divisoria que represente el ecuador y divida el mundo en los hemisferios sur y norte. A su vez, esta línea divide las dos filas que representan las zonas de menos latitud. Ambos modelos se caracterizan por la utilización de la vecindad de Von Neumann, que vincula a las celdas del modelo ortogonalmente (Norte, Sur, Este y Oeste), sin embargo, el modelo de probabilidad diferenciada utiliza una grilla toroidal de 12x12. El tamaño de la grilla puede ser modificado para realizar

nuevos experimentos. Futuras investigaciones deberán explorar esta vertiente, que excede los objetivos de la presente tesis.

Lo anterior, significa que se le agregaron propiedades nuevas al ambiente o mundo del modelo de Axelrod, lo que constituye la base de la probabilidad diferenciada de interacción, según la influencia del factor ecológico en determinada latitud. Para hacer inteligibles y calculables estas nuevas condiciones ambientales, fue necesario realizar una serie de cálculos. Lo primero que debió calcularse es la latitud del mundo sin ecuador, que corresponde a la diferencia del valor del pixel mínimo con el pixel máximo tomados de modo vertical. Se establece entonces un mundo con ecuador, dividiendo la grilla en dos hemisferios –es decir– para dejar el mismo número de celdas sobre y bajo el ecuador. Sobre ello se construye la latitud corregida, que va entre 0 y la altura del mundo dividida por dos. Para independizar el tamaño de la grilla de los cálculos, se establece un gradiente latitudinal (G) en 12 tramos, de modo que la latitud relativa vaya entre 0 y G=12. De este modo, se obtiene la latitud relativa, que estandariza los resultados en segmentos de latitud, para independizarlos del tamaño de la grilla.

El factor ecológico (E), en consecuencia, se obtiene restando 1 menos la latitud relativa. Éste representa la disposición diferenciada a la interacción según condiciones sociales evolucionadas ecológicamente (productividad primaria, concentración de patógenos u otras razones que generen menor probabilidad de interacción comunicativa en sectores más cercanos al ecuador).

Para permitir modular el factor ecológico y atribuirle niveles diversos de importancia en la probabilidad de interacción –de modo de hacer experimentos con el modelo– se introdujo  $\alpha$  o Alpha, que puede tomar valores entre 0 y 1, representando distintos escenarios de importancia relativa del factor ecológico en la probabilidad de interacción. Si Alpha es 0, el factor ecológico no tiene ninguna importancia y no debería generarse ningún patrón de diversidad cultural según gradiente latitudinal. Si Alpha es distinto de 0 y se tiende a aproximar a 1, la

importancia del factor ecológico tenderá a ser mayor, por lo que se esperaría un gradiente de diversidad cultural más marcado. Alpha, por lo tanto, es simultáneamente un elemento del ambiente y un elemento de los agentes, en su acoplamiento estructura. Sólo por motivos de presentación, se indica en la sección de ambiente, pero también corresponde incluirlo en la sección de agentes, ya que no es posible ni interesa determinar en esta investigación si la probabilidad de interacción depende en mayor medida de elementos sociales o de elementos ambientales.

Tabla 4 – Elementos del ambiente en el modelo de probabilidad diferenciada de interacción

Elementos del mundo	Símbolo	Definición/Cálculo
Alto del mundo	wh	<i>world-height</i> =[2,n]
Ancho del mundo	ww	<i>world-width</i> =[2,n]
Tamaño de la grilla	G	<i>world-width</i> * <i>world-height</i>
Peso del factor ecológico	$\alpha$	[0, 1]
Número de dimensiones culturales	f	<i>features</i> : [5;10;15]
Número máximo de rasgos culturales	t	<i>traits</i> : [5;10;15]
Latitud mundo sin ecuador	Ma	<i>world-height</i>
Latitud mundo con ecuador	Me	$[(wh/2)+1, -((wh/2)+1)]$
Latitud corregida	Lc	[0, (wh/2)+1]
Gradiente de latitud en 12 tramos	G	<i>gradient-columns</i> =12
Latitud relativa	Lr	[0,G]
Factor Ecológico	E	1-Lr

En la tabla se puede observa la simbología y la definición de cada uno de los elementos del ambiente o mundo. Se define entonces un alto y un ancho del mundo, con lo cual se calcula un tamaño de la grilla. También se establece que las dimensiones y los rasgos tendrán como los valores posibles 5, 10 y 15, aunque para el experimento de esta tesis sólo se utilice la combinación de 10 rasgos en 5 dimensiones. Con estos elementos ambientales, resta modificar los agentes para

que sean sensibles a estas nuevas condiciones ecológicas, así como formalizar matemáticamente las reglas de operación del modelo.

### 6.2.2 Agentes

Los agentes no varían mucho con respecto a los agentes del modelo original de Axelrod, ya que la modificación sólo consiste en hacerlos sensibles a las nuevas condiciones de probabilidad de interacción diferenciada latitudinalmente.

En el modelo sólo hay agente por celda de la grilla (según las coordenadas xy). Los agentes están programados como “patches” y no como “turtles”. Esto significa que tienen posición invariable en el mundo del modelo y ocupa un lugar en la grilla definido por sus coordenadas x e y.

Cada uno de los agentes posee una “cultura” caracterizado por un vector que representa determinados rasgos en un cierto número de dimensiones, que se simboliza  $[r_1, \dots, r_d]$ . Esto implica que cada agente o sitio cultural tienen dimensiones culturales (d) que representa los lugares, espacios o componentes del vector, y también poseen rasgos culturales (r), que representan valores en cada componente del vector. Por lo tanto, entre las propiedades del agente “sitio cultural” está tener un determinado nivel de complejidad cultural, dado por el número de dimensiones culturales y por el número máximo de rasgos culturales. Asimismo, posee un estado cultural variable, definido por los valores en los rasgos culturales.

Tabla 5 – Elementos de los agentes en el modelo de probabilidad diferenciada de interacción

Elementos de los agentes	Símbolo	Definición/Cálculo
Posición del sitio cultural	$[x,y]$	$[p_{ycor}, p_{xcor}]$
Configuración cultural	$[r_1, \dots, r_d]$	$[r_1, \dots, r_d]$
Similitud cultural	S	$r \text{ compartidos} / d$
Probabilidad de interacción	P	$P_i = p(S) - p(F)$

Como se detallará en el apartado siguiente referido a las reglas, los agentes pueden interactuar con otros agentes, según la vecindad de Von Neumann, en la misma probabilidad de su similitud (porcentaje de rasgos compartidos) respecto del otro agente aleatoriamente seleccionado y según la importancia del peso relativo del factor ecológico para la probabilidad de interacción.

Pueden también cambiar un rasgo a la vez por medio de la imitación, según interacción con otro sitio cultural. Si se homogeniza culturalmente con otro “sitio cultural” comienzan a formar “regiones culturales” y cuando se estabiliza la interacción –porque todos los agentes son iguales o todos son distintos en un grupo– los agentes dejan de interactuar y el modelo se estabiliza y termina.

### **6.2.3 Reglas**

Debido a un cierto isomorfismo entre los sitios culturales activos y pasivos del modelo de Axelrod y la concepción esquematizada de la doble contingencia de Luhmann –en la cual los sistemas que interactúan son denominados Alter y Ego– para explicitar las reglas de comportamiento se recurrirá a esta terminología para denominar los sitios culturales en interacción.

Las reglas de operación del modelo de probabilidad diferenciada opera según la siguiente secuencia: A cada tic, un sitio cultural “Ego” es seleccionado aleatoriamente. En un segundo momento, se selecciona al azar otro vecino según Von Neumann para ser “Alter”. La similitud entre los agentes Ego y Alter es el porcentaje de rasgos compartidos (S).

En estas condiciones, se establece que la probabilidad de interacción entre Ego y Alter depende de dos factores: Por una parte, depende de la similitud (S) entre Alter y Ego, es decir, de la probabilidad de interacción del modelo original de Axelrod. Por otra parte, depende también por el valor del “factor ecológico” E que

Ego aplica según la importancia relativa introducida por el investigador y según la latitud en que ALTER se encuentre.

En estas condiciones, las reglas de operación del modelo son las siguientes: la probabilidad de interacción está dada por la probabilidad de interacción por similitud (S) que describió Axelrod, menos la probabilidad de interacción dada por el factor ecológico (E).

$$P_i = p(S) - p(E)$$

La probabilidad dada por el factor ecológico (E) debe ser multiplicada por el peso del factor ecológico (que recorre entre 0 y 1), lo que es equivalente al peso del factor ecológico multiplicado por el inverso de la latitud relativa:

$$p(E) = \alpha E = \alpha (1 - Lr)$$

La tercera ecuación es una reproducción de la ecuación de probabilidad de interacción en el modelo de Axelrod, por lo tanto, está dada por la similitud definida por la proporción de rasgos compartidos entre las culturas Alter y Ego (entendido como coincidencia en el valor según posición de la dimensión):

$$p(S) = rc/d$$

Combinando las tres ecuaciones anteriores, se obtiene la ecuación general de probabilidad diferenciada de interacción:

$$P_i = rc/d - \alpha (1 - Lr)$$

Donde:

*P<sub>i</sub>*: Probabilidad de interacción

*S*: Similitud

*rc*: Rasgos compartidos

*d*: Dimensiones

*a*: Importancia del factor ecológico

*Lr*: Latitud relativa

La ecuación indica, en consecuencia, que la probabilidad de interacción en el nuevo modelo estará dada por la resta entre la probabilidad de interacción según similitud del modelo original de Axelrod y el factor ecológico aplicado según peso asignado y posición de los agentes en la grilla.

### **6.3 Resultados del modelo**

El modelo original de Axelrod no tenía considerada la probabilidad diferenciada latitudinalmente de interacción, por lo cual fue necesario generar nuevas variables para dar cuenta del resultado de las simulaciones y para comparar experimentalmente las variaciones de los parámetros.

Adicionalmente, según se observó en las primeras simulaciones realizadas en el curso de la investigación, se consideró necesario establecer condiciones de estabilización del modelo adicionales a las de Axelrod. Esto se justifica en la medida que se observaba que bajo ciertas condiciones la estabilización no se alcanzaba, producto de las nuevas condiciones de probabilidad diferenciada de interacción.

#### **6.3.1 Variables de resultado**

Para analizar los efectos de la introducción de probabilidad diferenciada de interacción en el modelo se diseñó una variable de salida, output o resultado, denominada  $\beta$  o Beta. Beta corresponde al gradiente latitudinal de diversidad cultural.

El coeficiente B o gradiente latitudinal de diversidad cultural indica el resultado de la probabilidad diferenciada de interacción. Beta se obtiene calculando la pendiente de los niveles de diversidad cultural obtenidos según latitud.

Para calcular Beta, primero se calcula el número de culturas distintas para cada latitud, por medio de un conteo simple. Luego, se genera un histograma dividido en 12 tramos de latitud iguales, de modo de estandarizar el resultado respecto del tamaño de la grilla. Entonces se normaliza la distribución dividiendo el número de culturas de cada tramo de latitud por la suma del número de culturas de todos los tramos de latitud. De este modo, la distribución se convierte en una función de densidad de probabilidad. Finalmente, se calcula el coeficiente de regresión lineal del histograma normalizado y sin normalizar. Para facilitar el análisis y evitar confusiones, por defecto Beta corresponderá al coeficiente de regresión normalizado.

Tabla 6 – Variables de resultado del modelo de probabilidad diferenciada de interacción

<b>Variables output o de resultado</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Definición/Cálculo</b>
Ticks o unidades de tiempo discretas	T	<i>Contar tics</i>
Número de culturas totales	n	<i>Contar regiones (Lr)</i>
Tamaño máximo de región cultural	m	<i>Contar sitios iguales</i>
Gradiente de diversidad cultural	$\beta$	<i>Pendiente Reg. Lr; n</i>

Adicionalmente, se consideran como variables de salida aquellas ya descritas por Axelrod. Por una parte, se incluye el número de tics o unidades de tiempo discretas que demoró el modelo en estabilizar, en las que cada una representa un ciclo o iteración del modelo. También se consideran como variables de resultado al número de culturas totales y el máximo tamaño de región cultural, que otorgan información respecto del nivel de convergencia cultural en cada jugada del modelo de probabilidad diferenciada de interacción.

### **6.3.2 Condiciones de estabilización del modelo**

Para el presente modelo de diversidad cultural se considerarán tres condiciones de estabilización, dos de las cuales son adicionales a las del modelo de Axelrod.

Se denominará “estabilización fuerte” cuando todas las regiones culturales son totalmente distintas (0% similitud) y por lo tanto la probabilidad de interacción es 0 y la densidad comunicativa alcanzó su máximo nivel, el sistema se estabiliza de forma autónoma sin interferencia del investigador. Esta forma de estabilización es la que utiliza Axelrod en el modelo original.

En este modelo se introduce la “estabilización débil”. Esta forma de definición de la estabilización intenta dar cuenta del “estado oscilatorio” o de “movimiento periódico” o de los modelos. El modelo se considerará “estabilizado” cuando el número de regiones culturales y el tamaño de la región más grande se mantengan invariables por 1000 unidades de tiempo.

También se considera un corte arbitrario de la simulación en caso de no estabilización en un tiempo prolongado: Si luego de transcurridas un millón de iteraciones el sistema continúa en la dinámica de interacción cultural con alta densidad comunicativa, el modelo se considerará no estabilizado. Futuras investigaciones con mayores recursos de tiempo y capacidad de procesamiento podrían determinar si el sistema se estabiliza más allá de un millón de iteraciones.

Estas formas de estabilización se proyectaron para la realización de experimentos adicionales a las variaciones de Alpha o del peso del factor ecológico (E), como el cambio del tamaño de la grilla, la modificación de las condiciones de complejidad cultural y la modificación del tipo de vecindad utilizada. Para el experimento central de variaciones de Alpha, sólo se obtuvieron estabilizaciones por el primer criterio (estabilización fuerte) que es el indicado por Axelrod.

## 6.4 Comparación entre ambos modelos

A continuación y a modo de síntesis, se presentan las principales diferencias introducidas en el modelo de probabilidad diferenciada de interacción respecto del modelo de original de diseminación cultural de Axelrod.

Tabla 7 – Comparación de las versiones estándar del modelo de Axelrod y del Modelo de Probabilidad Diferenciada de Interacción

ASPECTO	MODELO ESTÁNDAR DE DISEMINACIÓN CULTURAL	MODELO ESTÁNDAR DE INTERACCIÓN DIFERENCIADA
<b>Ambiente</b>	Grilla cuadrada de 10x10 con probabilidad homogénea de interacción	Grilla toroidal de 12x12 con probabilidad diferenciada de interacción según la latitud en que los agentes culturales se encuentren
<b>Agentes</b>	Interactúan con vecinos sin distinción de posición, formando progresivamente áreas de convergencia y divergencia cultural geográficamente indiferenciadas. Operan según la vecindad de Von Neumann	Interactúan diferenciadamente según posición relativa dada por la latitud, formando progresivamente áreas de convergencia y divergencia cultural geográficamente diferenciadas, en las que la divergencia se concentra en el ecuador. Operan según la vecindad de Von Neumann
<b>Reglas</b>	$P_i = rc/d$ <p>La probabilidad de interacción comunicativa entre las culturas es igual a la proporción de rasgos compartidos de ambos sitios culturales. La interacción resulta en imitación de un rasgo.</p>	$P_i = rc/d - \alpha (1 - Lr)$ <p>La probabilidad de interacción comunicativa es la probabilidad de Axelrod menos la importancia del factor ecológico latitudinal, que indica mayor probabilidad de interacción en latitudes más altas. La interacción resulta en imitación de un rasgo.</p>

## 6.5 Operatoria del modelo y pseudo-programación

Finalmente, con las condiciones explicitadas en los apartados anteriores, el modelo de probabilidad diferenciada opera según la siguiente secuencia:

Tabla 8 – Pseudo-programación del modelo de probabilidad diferenciada de interacción

MOMENTO	PSEUDO-PROGRAMACIÓN
<b>Posición inicial</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disposición de parámetros modificables por el investigador (Alpha)</li> <li>• Disposición aleatoria de culturas, con vectores dimensiones y rasgos en la grilla.</li> </ul>
<b>Selección de agentes</b>	Selección sucesiva: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Selección equi-probable de un agente o sitio cultural Ego.</li> <li>• Selección equi-probable de un vecino según vecindad de Von Neumann para ser Alter.</li> </ul>
<b>Decisión de Interacción</b>	Decisión de interacción simultánea: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ego interactúa con Alter según la similitud.</li> <li>• Ego interactúa con Alter según el “factor ecológico”.</li> </ul>
<b>Interacción comunicativa</b>	Si la decisión de interacción resulta positiva: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ego copia rasgo no previamente compartido con Alter.</li> </ul> Si la decisión de interacción resulta negativa <ul style="list-style-type: none"> <li>• De lo contrario, no hay cambios.</li> </ul>
<b>Continuidad o estabilización</b>	El modelo continúa iterando a menos que ocurra: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabilización fuerte</li> <li>• Estabilización débil</li> <li>• No estabilización</li> </ul>
<b>Resultados</b>	Resultados visuales: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grilla estabilizada con fronteras culturales</li> <li>• Histograma del gradiente latitudinal de diversidad cultural</li> <li>• Gráfico de regiones culturales y tamaño de cultura</li> </ul> Resultados numéricos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beta, tics, número de regiones, tamaño de cultura mayor.</li> </ul>

## 7 PROGRAMACIÓN DEL MODELO PARA LA SIMULACIÓN

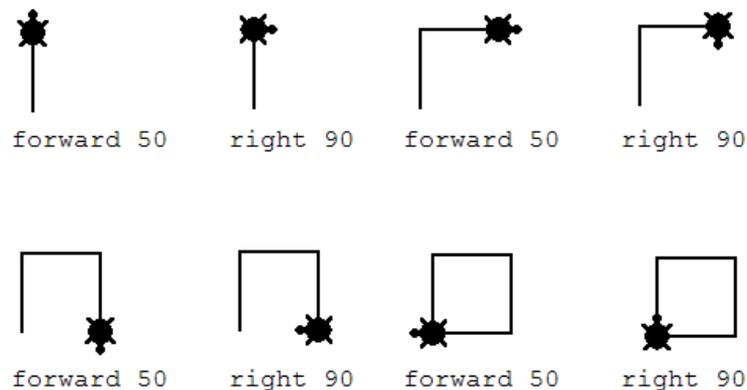
El modelo de probabilidad diferenciada de interacción fue desarrollado en Netlogo 4.3.1. El modelo es una modificación del modelo clásico de diseminación cultural de Axelrod (1997). La programación fue realizada por Juan Razeto (IFICC).

### 7.1 El programa Netlogo 4.1.3

Esta investigación fue desarrollada en el programa computacional Netlogo, en su versión 4.3.1. El programa Netlogo es una plataforma de programación diseñada para la modelación y simulación de sistemas complejos naturales y sociales en evolución creado por Uri Wilensky en 1999. Netlogo está desarrollo continuo por el *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling* en la Universidad de *Northwestern*.

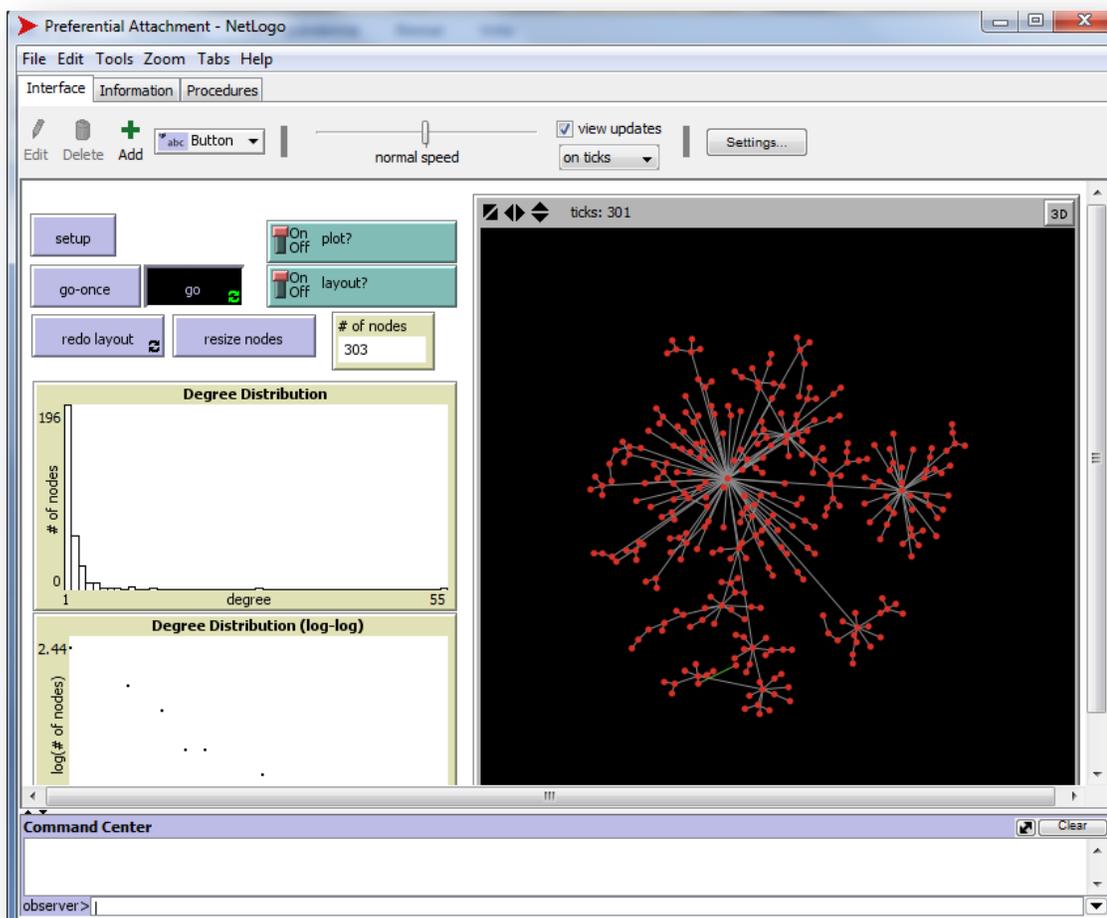
El antecedente de Netlogo es el conocido programa Logo, creado en 1967 Wally Feurzig y Seymour Papert en la compañía BBN con fines educativos. Logo se hizo mundialmente famoso cuando se introdujo la tortuga que permitía retroalimentación visual inmediata en el MIT en 1969, que comenzó a utilizarse en escuelas hacia la década de los 70. El programa Netlogo es heredero de la tradición de Logo, al punto que sus agentes se denominan “Turtles” o tortugas, como en las primeras versiones de Logo.

Figura 12 – Ejemplo de instrucciones de Logo para generar un cuadrado con la tortuga (Imagen: Logo Foundation)



La principal utilidad de Netlogo dice relación con la modelación de sistemas complejos evolutivos. Los modeladores instruyen modos de comportamiento a miles de agentes que operan de manera independiente, relacionándose de una manera particular entre ellos y respecto de su ambiente. Así se explora la relación entre el comportamiento individual y las regularidades macro-estructurales emergentes de la interacción. Los usuarios de Netlogo pueden estudiar el comportamiento de simulaciones en varias condiciones prediseñadas, pueden modificar los modelos para introducir nuevas condiciones o bien, pueden crear sus propios modelos. En la actualidad, es suficientemente potente para servir como una herramienta de investigación y en varias publicaciones científicas del más alto nivel se publican modelos realizados con Netlogo.

Figura 13 – Visualización de Netlogo 4.3.1



Netlogo puede descargarse gratuitamente (<http://ccl.northwestern.edu/netlogo>) y además de la plataforma de programación trae consigo una librería de modelos pre-programados con una amplia selección de modelos validados y por validar, tanto en ciencias naturales como en ciencias sociales.

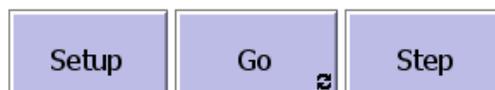
Los elementos de programación de Netlogo son fundamentalmente tres: *patches*, *turtles* y *links*, en alguna medida correspondientes con los elementos básicos del modelamiento basado en agentes: ambiente, agentes y reglas de interacción. Los patches son elementos que constituyen el ambiente de los mundos y sociedades artificiales de Netlogo, son inmóviles –tienen una sola posición– y tienen pueden tener como propiedad un cierto estado. Las turtles o tortugas son los agentes, que tienen posición variable. Tanto tortugas como agentes interactúan por medio de links o vínculos, que representan las reglas de interacción.

La programación completa en Netlogo –las 436 líneas de código fuente– del modelo de probabilidad diferenciada de interacción puede encontrarse en anexo.

## 7.2 Controles del modelo

Netlogo ofrece –independiente de la plataforma de procedimientos de programación– una plataforma de control del modelo a nivel de usuario. En el caso del modelo de probabilidad diferenciada de interacción, se utilizan tres tipos de controles: botones, deslizadores e interruptores.

Figura 14 – Botones básicos del modelo de probabilidad diferenciada de interacción



El modelo cuenta con tres botones básicos de control del modelo: el botón “Setup”, que dispone de las condiciones iniciales tanto las aleatorias como los

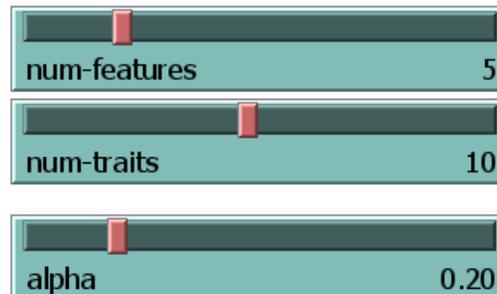
parámetros modificables por el investigador. El segundo de los botones básicos es el “Go” que, una vez que el modelo está dispuesto con sus parámetros y condiciones iniciales, pone a correr el modelo. Adicionalmente, también se cuenta con el botón “Step”, que permite realizar un iteración a la vez (avanzar una unidad de tiempo o tics). A estos botones se agrega el botón complementario de actualización de los resultados en los visualizadores gráficos y numéricos.

Figura 15 – Botón de actualización de visualizaciones del modelo de probabilidad diferenciada de interacción



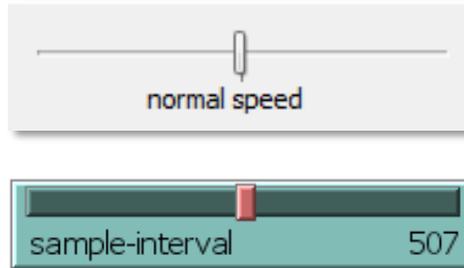
Para la determinación del nivel de complejidad de los sistemas socioculturales modelados y el peso relativo del factor ecológico en la probabilidad de interacción, hay dos “sliders” o deslizadores que permiten modificar el número de dimensiones (features) y de rasgos (traits) de las culturas, así como permite establecer Alpha.

Figura 16 – Deslizadores de complejidad cultural y peso relativo del factor ecológico del modelo de probabilidad diferenciada de interacción



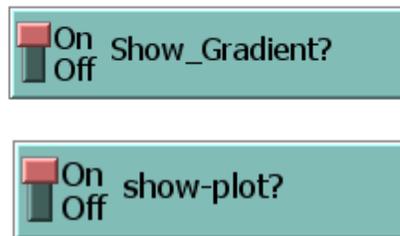
Otros deslizadores relevantes dicen relación con las opciones de operación y de visualización del modelo. Hay un botón en la zona superior de la interfaz que permite acelerar o ralentizar la velocidad de las iteraciones y otro botón en el lienzo de trabajo que permite determinar el número de iteraciones según el cual el modelo entrega resultados:

Figura 17 – Deslizadores de velocidad del modelo y de intervalo de muestra del modelo de probabilidad diferenciada de interacción



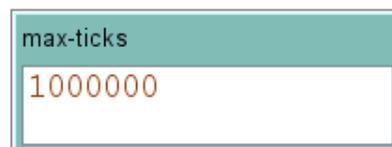
El tercer tipo de control que posee el modelo de diversidad cultural es el interruptor. El modelo utiliza interruptor para habilitar o deshabilitar la visualización de los gráficos (histograma y gráfico de formación de culturas según tiempo). Al deshabilitar estos visualizadores, el computados puede usar su capacidad en procesar los resultados de modo más rápido sin tener que utilizar parte de sus recursos en el procesamiento de visualizaciones cuando no son necesarias.

Figura 18 – Interruptores de visualización de gráficos del modelo de probabilidad diferenciada de interacción



Netlogo ofrece también un visualizador que puede establecer condiciones al modelo. El modelo tiene un determinador de la cantidad de tics o tiempos discretos para detenerse. Este control visualizador permite detener el modelo en momentos específicos del tiempo durante la realización de experimentos.

Figura 19 – Control de número máximo de iteraciones del modelo de probabilidad diferenciada de interacción

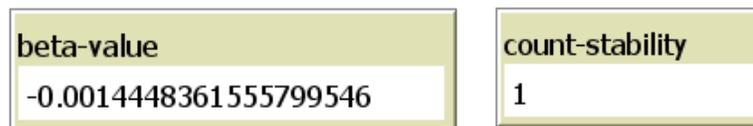


### 7.3 Visualizadores de resultados

A los interruptores, deslizadores y botones se agregan visualizadores. Los visualizadores, a diferencia de los controles, no son editables y sólo presentan las condiciones de operación del modelo.

El modelo de probabilidad diferenciada de interacción tiene como visualizador numérico principal aquel que indica el valor de Beta para cada momento de la evolución del modelo y adicionalmente, muestra un contador de estabilidad, que representa las unidades de tiempo sin variaciones.

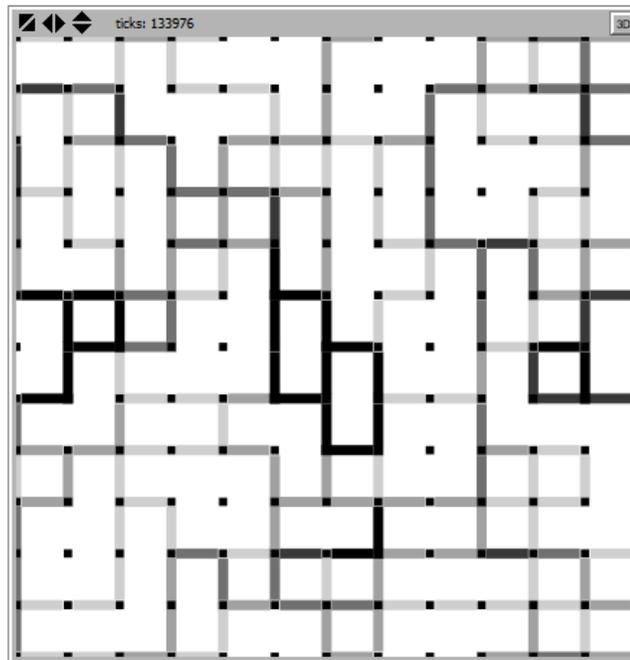
Figura 20 –Visualizador numérico del valor de Beta y contados de estabilidad del modelo de probabilidad diferenciada de interacción



Como visualizadores gráficos el modelo de probabilidad diferenciada incluye la grilla en que se presentan los sitios culturales y las fronteras de similitud que se generan entre ellas. Este visualizador permite observar el funcionamiento del modelo, así como observar la formación de patrones de convergencia y divergencia cultural, así como identificar la distancia al ecuador en que se van estabilizando las zonas culturales.

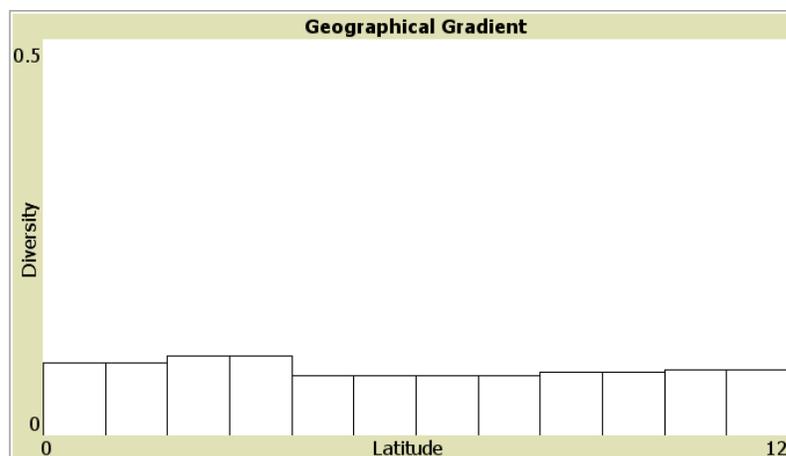
El visualizador de la grilla también presenta las unidades de tiempo transcurridas, para dar una idea de la forma de evolución de la simulación vinculada a los patrones generados a nivel estructural.

Figura 21 – Visualizador de la grilla del modelo de probabilidad diferenciada de interacción



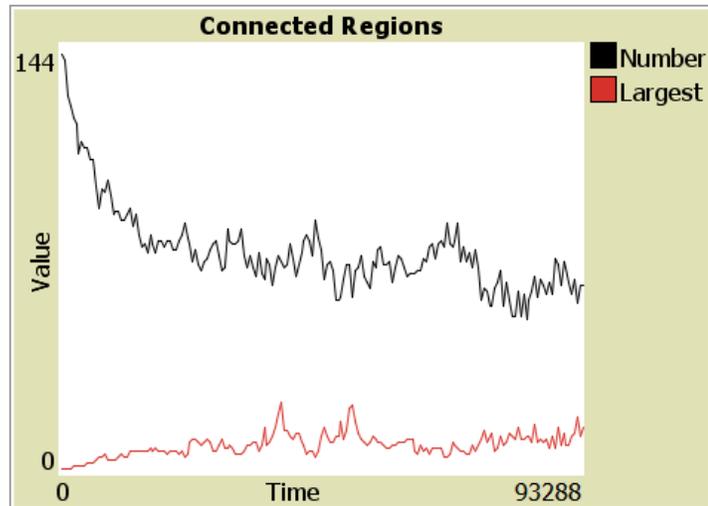
La interpretación directa de la evolución y de los resultados del modelo en la grilla es complementada con el histograma latitudinal de diversidad cultural. Como el cálculo del gradiente latitudinal se realiza sobre la normalización en 12 tramos, para luego sumarse los gradientes norte y sur, el gráfico representa una distribución de probabilidad desde 0 (menor latitud) a 12 (mayor latitud).

Figura 22 – Visualizador de la histograma de diversidad cultural según latitud del modelo de probabilidad diferenciada de interacción



Finalmente, el modelo también presenta un gráfico de la evolución del número de regiones culturales y del tamaño de la mayor zona cultural según unidades de tiempo.

Figura 23 – Visualizador del número de zonas culturales y del tamaño de la mayor zona cultural del modelo de probabilidad diferenciada de interacción



A medida que las curvas se van encontrando y finalmente, cruzando, el modelo tiende a la estabilización.

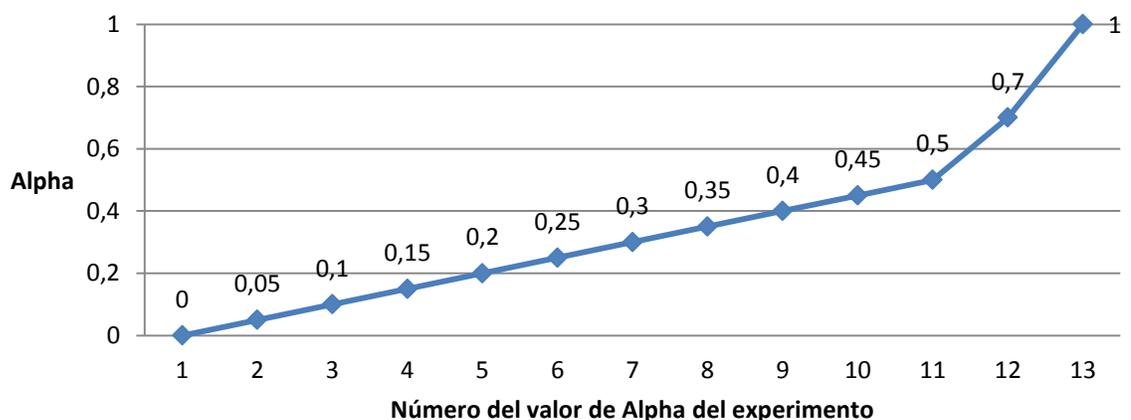
## 8 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Aunque originalmente el modelo de probabilidad diferenciada de interacción fue concebido para realizar con él una serie de experimentos, por motivos de limitación de tiempo y recursos de procesamiento, sólo se realizó el experimento principal, dejando para futuras investigaciones la realización de los otros experimentos que podrían complementar y validar los resultados del experimento central. Por ello, este capítulo detallará el diseño del experimento central –referido a los efectos de las variaciones en el peso del factor ecológico en la probabilidad de interacción comunicativa– y dejará enunciados los experimentos secundarios que puedan ser llevados a cabo en el futuro.

### 8.1 Experimento principal: variaciones en el peso del factor ecológico

El experimento principal consiste en estudiar el comportamiento del modelo de probabilidad diferenciada de interacción, se hicieron experimentos para 13 valores de Alpha, que puede tomar valores entre 0 y 1. A medida que el valor se aproxima a 0, el peso del factor ecológico se reduce y, a medida que se aproxima a 1, se incrementa. Todos los experimentos se hicieron con el modelo estándar de probabilidad diferenciada de interacción, es decir, con una grilla toroidal de 12x12, con agentes con 5 dimensiones y 10 rasgos culturales.

Gráfico 5 – Valores de Alpha ordenados correlativamente utilizados en el experimento



Como se observa en el gráfico superior, se seleccionaron 13 valores de Alpha, pero la distancia entre esos intervalos no fue siempre la misma. Entre los valores de Alpha 0 y 0,5, se tomaron intervalos cada 0,05 unidades de incremento. Por ello, entre estos valores el gráfico presenta una relación lineal entre el valor de Alpha y la posición de cada Alpha experimentado.

Por el contrario, para los valores de Alpha entre 0,5 y 1, no se realizó un mapeo tan fino como en los primeros intervalos. Esto se realizó debido a que en las primeras simulaciones se observó que el patrón tendía a generarse ya desde un Alpha cercano a 0,2 y, debido a la gran cantidad de recursos de procesamiento y tiempo necesario para realizar las simulaciones, se decidió utilizar el  $\text{Alpha}=0,7$  como valor intermedio entre 0,5 y 1.

Siguiendo el ejemplo de Axelrod –y considerando las limitaciones de tiempo y recursos de procesamiento computacional– para cada uno de los experimentos con los 13 valores de Alpha se realizó un total de 10 simulaciones, es decir, 10 ciclos completos hasta la estabilización del modelo. Esto permite extraer estadísticas descriptivas de los resultados de las simulaciones. Si bien el foco de esta tesis no es establecer la significancia estadística de estos resultados –lo que tampoco es posible debido a las restricciones de tiempo y recursos computacionales– un total de 10 iteraciones por experimento son suficientes para marcar tendencias y para evitar valores extremos en los promedios de los resultados. Investigaciones futuras podrán realizar demostraciones más extensas estadísticamente del patrón generado por el modelo.

La variable de output o salida más relevante para los experimentos es el valor de Beta, que representa la pendiente del gradiente latitudinal. En la medida que la pendiente sea negativa y se aleje lo más posible de 0, la hipótesis de que la probabilidad diferenciada de interacción genera mayor divergencia cultural en las zonas de menor densidad comunicativa será verificada. Asimismo, los valores de Beta para cada Alpha darán luces respecto de la relación entre la el factor

ecológico que altera la probabilidad de interacción y la sensibilidad que tiene la sociedad artificial a las variaciones de Alpha.

Como variables de salida complementarias se incluirán el número de unidades de tiempo que tomó la estabilización de cada simulación, el número de culturas resultantes y el tamaño de la cultura mayor que genere cada iteración del modelo.

## **8.2 Experimentos proyectados**

El modelo tiene la potencialidad de realizar otros experimentos, que permitan observar la relación entre Alpha y Beta en contextos diferenciados, como lo hiciera Axelrod en su artículo clásico.

La presente tesis, sin embargo, se restringe a dejar algunos de ellos enunciados para ser realizados en el futuro:

- Indagación de los efectos del tamaño del territorio en la relación entre la probabilidad de interacción y el gradiente latitudinal de diversidad cultural.
- Estudio de los efectos de la mayor o menor complejidad cultural en la relación entre la probabilidad de interacción y el gradiente latitudinal de diversidad cultural.
- Investigación sobre las consecuencias de la mayor o menor extensión de la vecindad del modelo en la relación entre la probabilidad de interacción y el gradiente latitudinal de diversidad cultural.

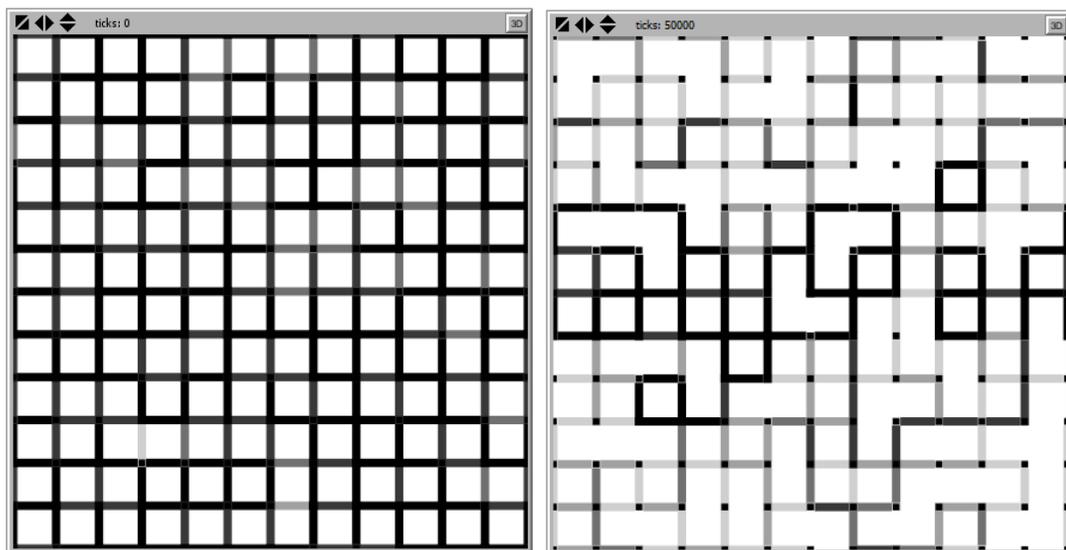
## 9 RESULTADOS

Como primera serie de resultados, se presentará una “simulación tipo” con un nivel de Alpha suficientemente alto para hacer emerger el patrón latitudinal de diversidad cultural. El modelo se corrió con un Alpha de 0,2 en su forma estándar (grilla de 12x12, Vecindad de Von Neumann, 5 dimensiones y 10 rasgos culturales). La segunda serie de resultados utilizará medidas de resumen estadístico y gráficos que den cuenta de la relación entre los parámetros de input y los resultados de output, a nivel de tiempo de estabilización, tamaño máximo de la cultura mayor y número de culturas finales. Una vez presentados los resultados de nivel descriptivo, se expondrán los resultados que relacionan las variables centrales de la investigación Alpha y Beta, que representan la probabilidad diferenciada de interacción y el gradiente latitudinal de diversidad cultural respectivamente.

### 9.1 Resultados de una simulación tipo del modelo

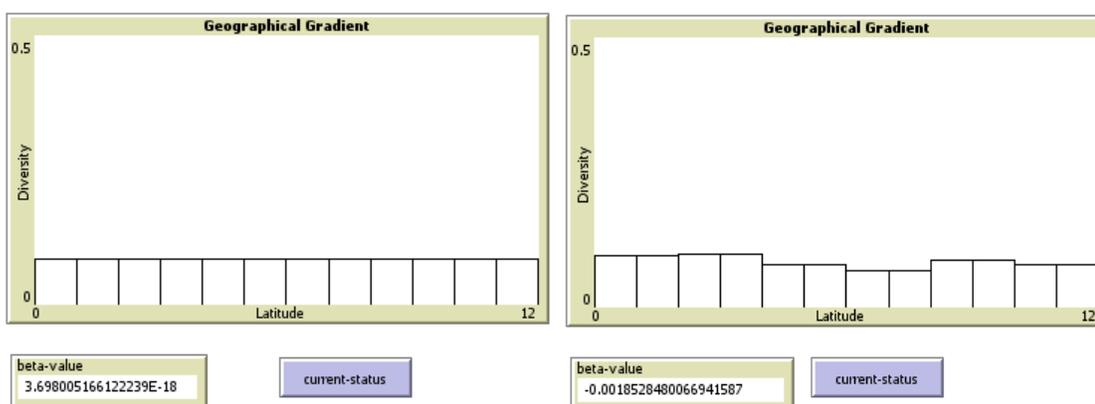
En las primeras iteraciones del modelo –entre la disposición inicial aleatoria en el tiempo 0 y hasta el tics 50.000– se producen rápidamente variaciones que dan cuenta de la conformación de patrón latitudinal de diversidad cultural.

Figura 24 – Evolución del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 0 y 50 mil



La grilla pasa rápidamente de tener fronteras mayoritariamente negras o grises oscuras a una convergencia en la similitud cultural. Aunque aún las regiones culturales no se han formado completamente y persisten fronteras culturales, éstas son más atenuadas hacia el tiempo 50 mil. Sin embargo, se mantienen las fronteras que representan mayor heterogeneidad cultural en la zona del ecuador de la grilla.

Gráfico 6 – Histogramas del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 0 y 50 mil



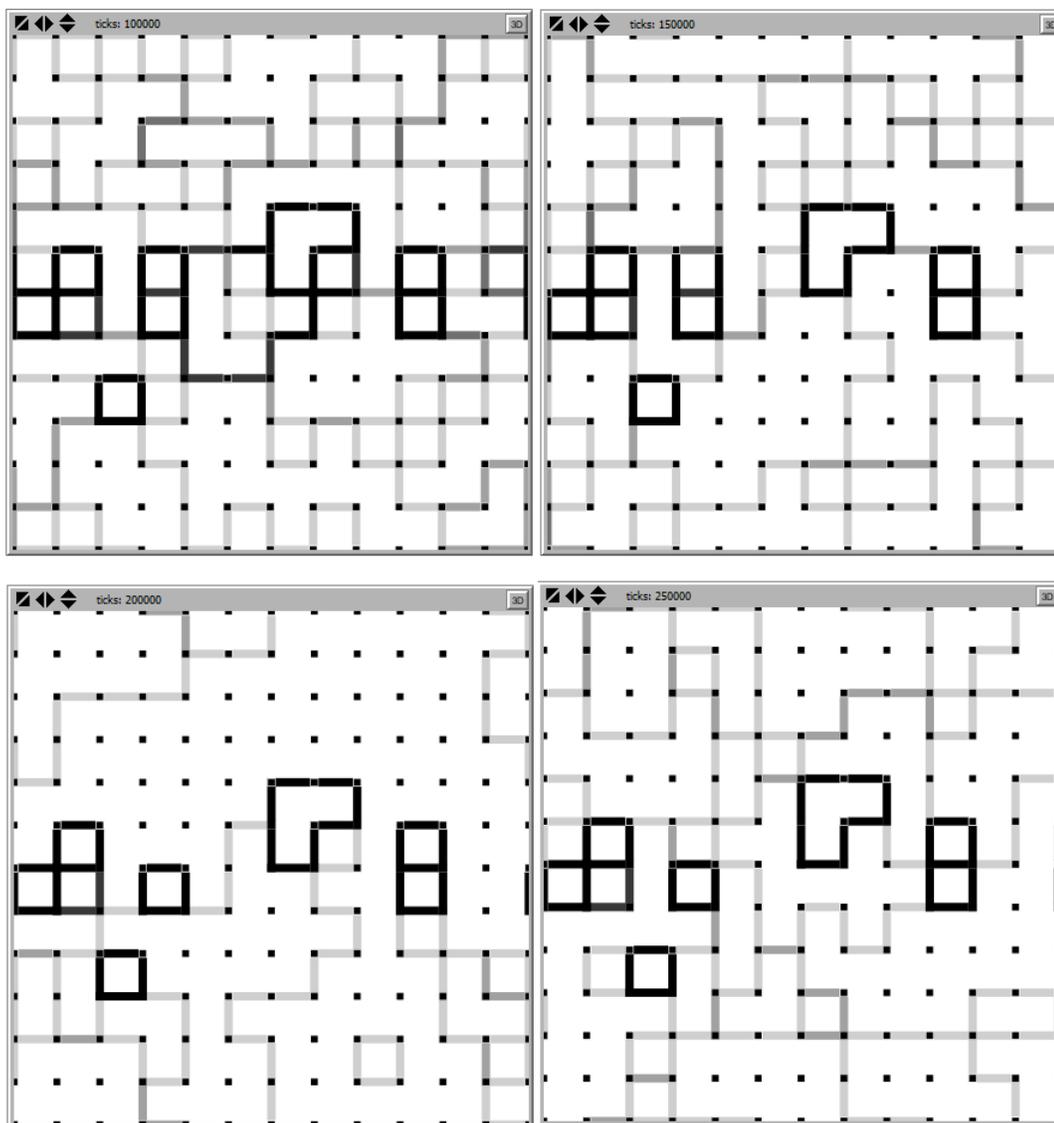
Aunque la grilla ya indica una cierta tendencia hacia la mayor heterogeneidad cultural en los polos, esto no se expresa en el histograma. Lo anterior se debe a que aún permanecen fronteras culturales, aunque atenuadas, en la zona de los polos.

El Beta en el tiempo 0 tiene un valor muy bajo y prácticamente igual 0, hasta el punto que debe presentarse como notación científica decimal. Hacia el tiempo 50 mil, en cambio, el valor de beta ya es negativo aunque muy bajo (aproximadamente -0,0019).

En la figura siguiente se agrupan cuatro momentos de la evolución del modelo, entre los tiempos 100 mil y 250 mil. Este período se caracteriza por un balance entre estabilidad e inestabilidad en sectores diversos de la grilla. La estabilidad se presenta en las culturas más divergentes en la zona del ecuador, que presentan

fronteras oscuras, simbolizando grandes diferencias culturales con los sitios aledaños. Por otra parte, se evidencia gran inestabilidad en las zonas de los polos, generándose grandes cambios en zonas culturales, aunque manteniendo una mayor homogeneidad en términos globales, como lo demuestran los colores más tenues de sus fronteras.

Figura 25 – Evolución del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 100 mil y 250 mil

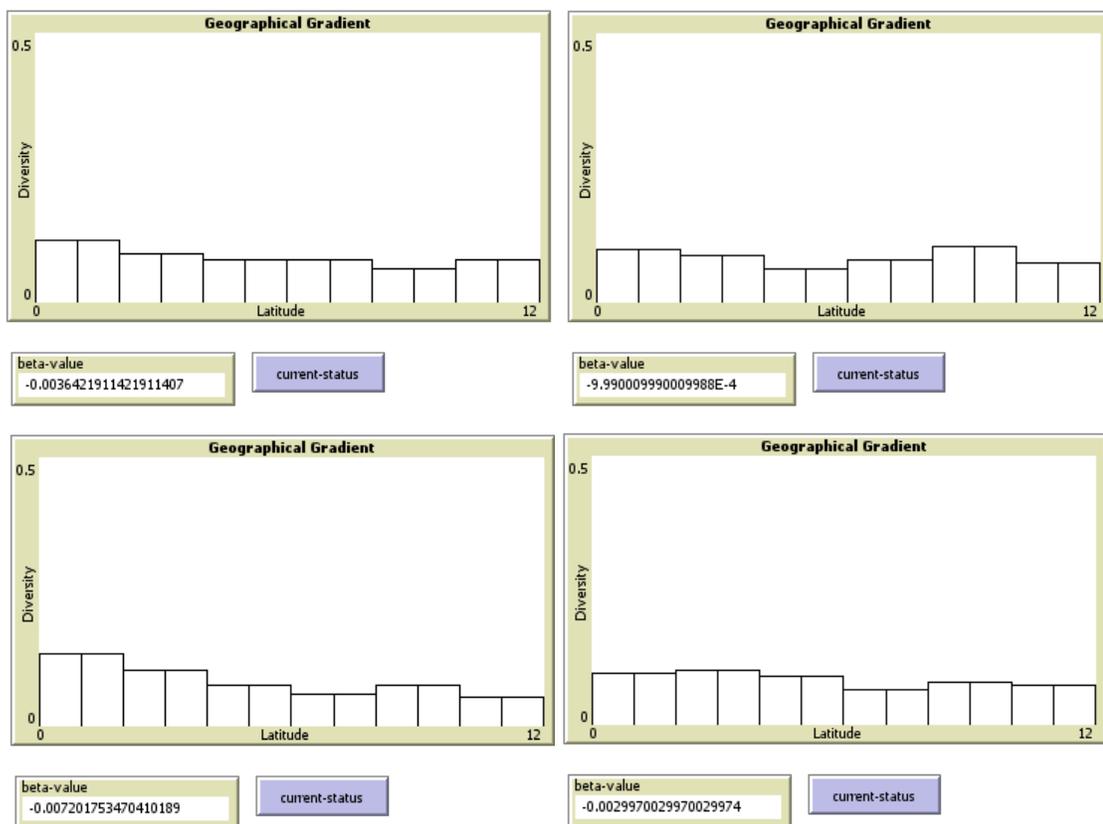


En estos cuatro momentos en el tiempo de la simulación, es posible observar que los patrones de diversidad cultural pueden ser rastreados hasta en épocas muy

tempranas de la evolución cultural: en general, los patrones emergen rápidamente en la zona del ecuador, aunque el modelo se estabiliza hasta momentos muy avanzados de su desarrollo.

Al analizar los resultados por medio de los histogramas, no se ve reflejado en este momento el patrón de diversidad cultural como ya se puede ver en la grilla, debido a que el gradiente sólo considera las culturas totalmente distintas entre sí como culturas establemente distintas (lo cual en el polo es muy variable).

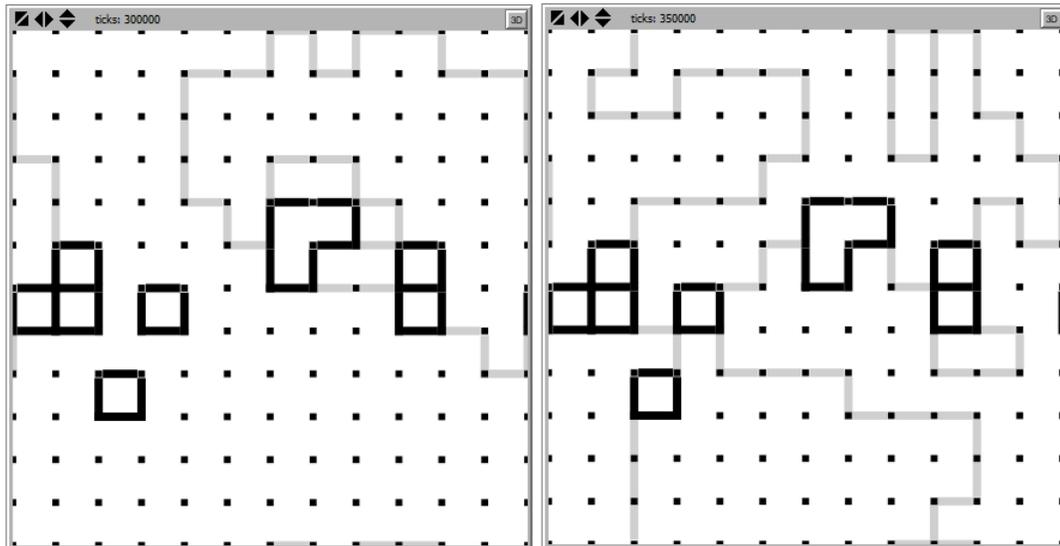
Gráfico 7 – Histogramas del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 100 mil y 250 mil



Los valores Beta entre 100 mil y 250 mil unidades de tiempo son muy variables, aunque todos mantienen el signo positivo, reproduciendo la emergencia del patrón al menos en baja intensidad.

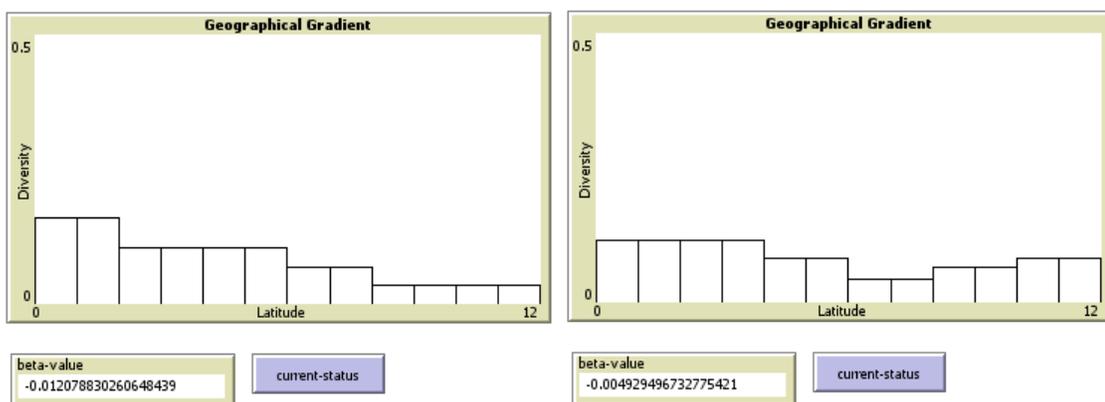
Entre los tiempos 300 mil y 350 mil, ya queda claro que las culturas divergentes, pequeñas y compactas en el ecuador no van a variar hasta la estabilización del modelo. Los únicos cambios se producen en la zona de los polos, cada vez con fronteras más atenuadas, denotando mayor homogeneidad.

Figura 26 – Evolución del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 300 mil y 350 mil



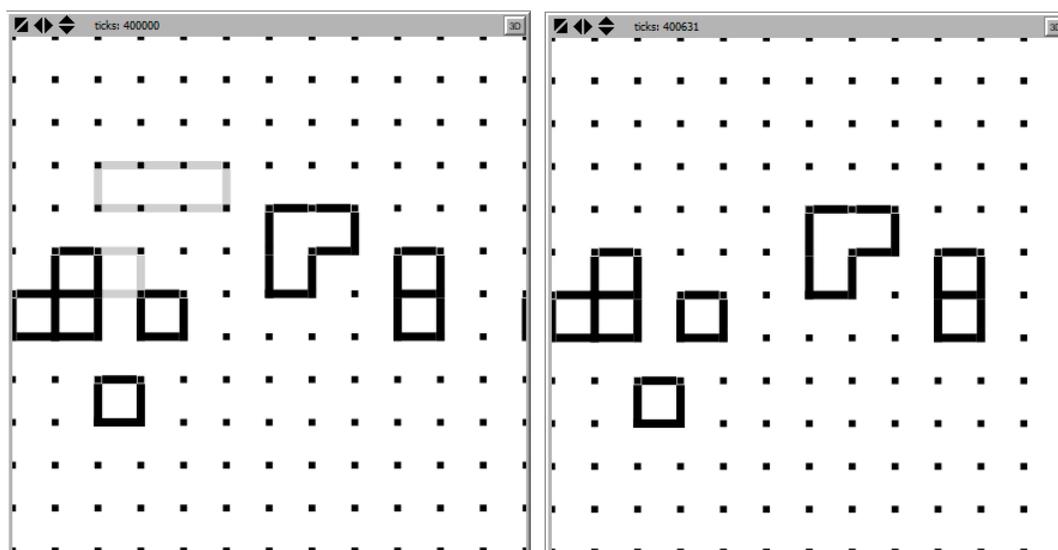
Sin embargo, tanto el histograma como el valor de Beta aún permanecen con alta variabilidad. En este punto, ya es claro que relación entre la diversidad cultural y la latitud es negativa, pero como se ve en el histograma de la izquierda, aún hay sectores polares que pueden tener más diversidad cultural que sectores más cercanos al ecuador.

Gráfico 8 – Histogramas del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 300 mil y 350 mil



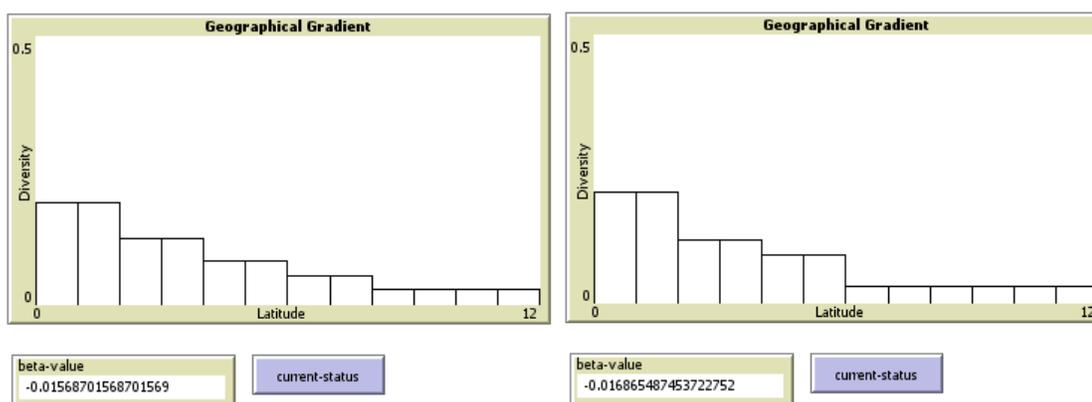
Ya en torno al tiempo 400 mil, el modelo se estabiliza, debido a que se generó convergencia a nivel global y divergencia cultural a nivel local. La mayor diversidad y heterogeneidad cultural, como se esperaba, se produjo en la zona del ecuador.

Figura 27 – Evolución del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 400 mil y 400.631



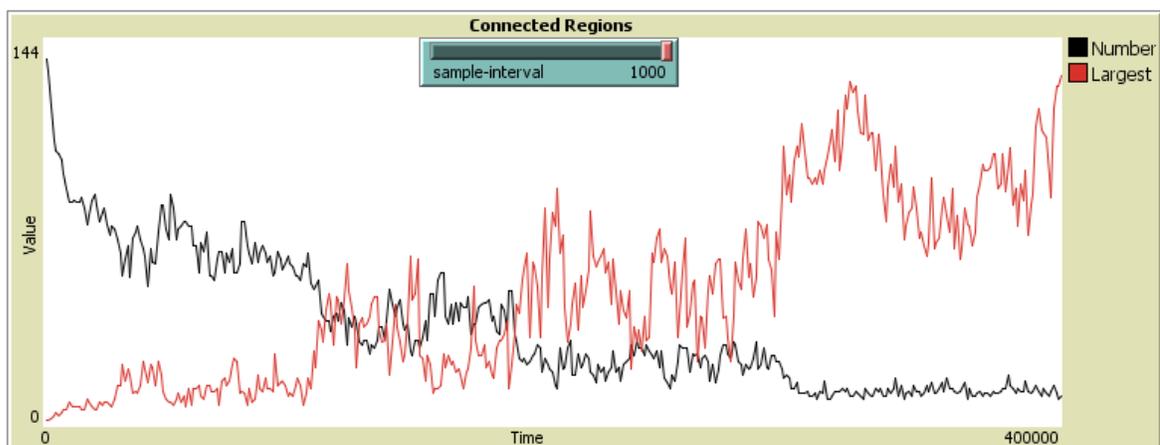
Los histogramas, en este punto de estabilización, exponen claramente el gradiente de diversidad cultural, en la medida que la diversidad cultural es claramente mayor en las zonas de baja latitud y comienza a homogeneizarse hacia los polos. En la estabilización, Beta alcanza también su mayor intensidad (-0,0169).

Gráfico 9 – Histogramas del modelo de probabilidad diferenciada de interacción entre tiempos 400 mil y 400.631



Sin embargo, esta estabilización –ya como resultado– no se produjo sin pasar por una evolución muy compleja e inestable en ciertos períodos. Como se observa en el gráfico siguiente, en los primeros 100 mil tics comienza un rápido descenso del número de culturas, a medida que se hace más grande el tamaño de la cultura mayor, lo que indica aumento en la homogeneidad.

Gráfico 10 – Evolución del número de zonas culturales y el tamaño máximo de la cultura mayor en 400 mil unidades de tiempo graficadas cada 1000 iteraciones



Por el contrario, en el primer cuartil de tiempo aproximadamente, si bien hay un aumento del tamaño de la cultura mayor del modelo, el aumento tiende a ser menos acelerado. Entre el tiempo 100 mil y el tiempo 300 mil aproximadamente, el modelo presenta una gran inestabilidad. Por un período prolongado el modelo parece acercarse a la estabilización, pero no ocurre con gran velocidad ya que así como se reduce el número de zonas culturales, también aumenta en algunas iteraciones.

Sobre el tiempo 200, ya la tendencia es clara: el número de zonas culturales se reduce, al tiempo que se reduce también su variabilidad. Simultáneamente, el tamaño de la cultura mayor aumenta, ya que se disuelven las últimas barreras culturales tenues que persistían en los polos. Las barreras más oscuras, es decir, las de mayor divergencia, se estabilizan en la zona del ecuador, haciendo emerger

culturas más compactas y diferenciadas allí donde la probabilidad de interacción es más baja.

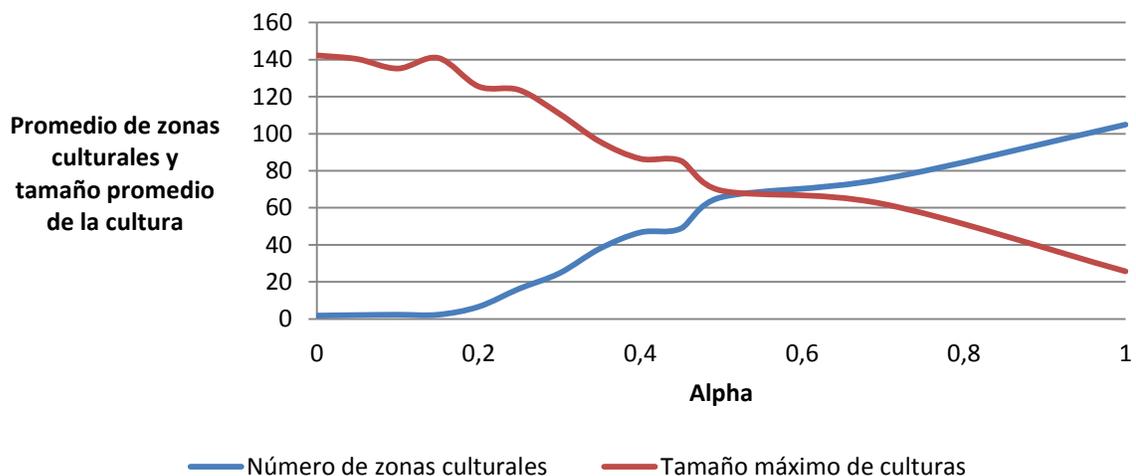
Con esta simulación, se demuestra que la tendencia a la convergencia global y a la polarización local ocurre, tal como predijera Axelrod. Sin embargo, esta convergencia local no es aleatoria, sino que se concentra en aquellas zonas del mundo en que la probabilidad de interacción comunicativa es menor.

## 9.2 Resultados de variaciones de Alpha en variables secundarias

No sólo existe una relación inversa entre número de zonas culturales y el tamaño máximo de la cultura mayor a medida que el modelo evoluciona. También se da una relación inversamente proporcional si estas variables de output secundarias son agregadas y presentadas en función de los valores diferenciados de Alpha.

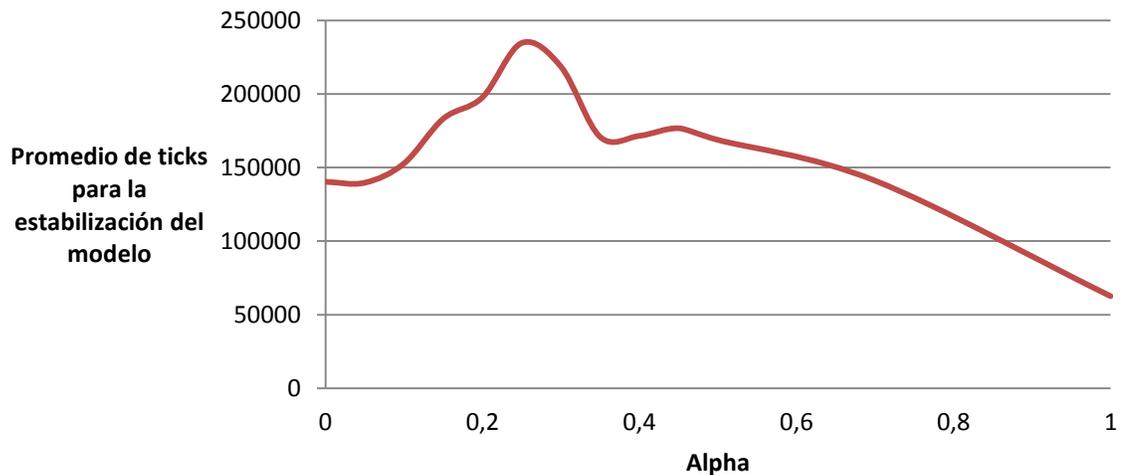
Como se presenta en el gráfico, el promedio de número de zonas culturales en el modelo estabilizado va aumentando a medida que se incrementa el valor de Alpha, al tiempo que lo inverso ocurre respecto del tamaño máximo promedio de la cultura mayor.

Gráfico 11 – Promedio de número de zonas culturales y tamaño promedio de cultura en 10 iteraciones según variaciones de Alpha



Esto significa que cuando el valor de Alpha es menor, se genera mayor homogeneidad cultural a nivel agregado y lo contrario a medida que Alpha se acerca al valor 1, según los resultados para 10 iteraciones).

Gráfico 12 – Promedio de tiempo para la estabilización del modelo en 10 iteraciones según variaciones de Alpha



Adicionalmente, se constata que el número de iteraciones o de unidades de tiempo necesarias para la estabilización también varían según los valores de Alpha. Sin embargo, esta variación no es de carácter lineal, sino que presenta dos zonas de sensibilidad y una transición de fase, característica propia del comportamiento de los sistemas complejos.

Desde  $\text{Alpha}=0$  y con el aumento de su valor, la relación es positiva, requiriéndose cada vez más iteraciones para la estabilización del modelo. Esta tendencia alcanza su *peak* cerca de  $\text{Alpha}=0,25$ , con casi 250 mil unidades de tiempo en promedio. Desde ese momento, se produce una transición de fase en la relación y la relación se torna negativa: la cantidad de tics para lograr estabilización se va reduciendo progresivamente hasta llegar a cerca de 50 mil turnos o tiempos en promedio para estabilizarse.

El valor del peso relativo del factor ecológico, que produce las diferencias en la probabilidad de interacción, por tanto se relaciona linealmente con el aumento de zonas culturales y con el tamaño máximo de la cultura mayor, en una relación

negativa en esta última variable. Sin embargo, lo que más llama la atención es la relación entre los valores de Alpha y el tiempo necesario para la estabilización del modelo sea una relación no lineal, con un aumento entre los valores de Alpha entre 0 y 0,2, tendencia que se revierte desde Alpha=0,25 en adelante.

### **9.3 Resultados de Beta según probabilidad diferenciada de interacción**

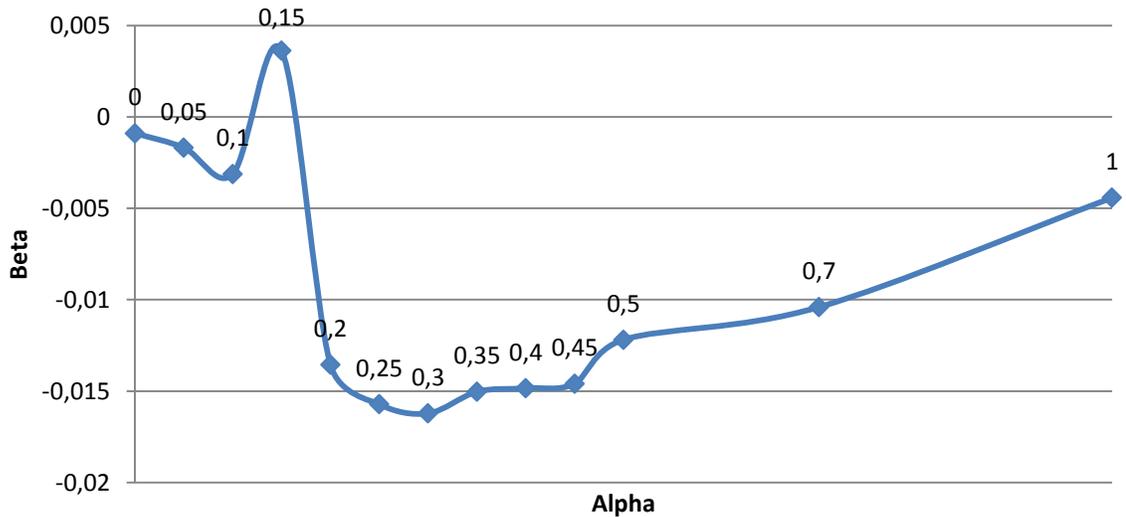
El experimento principal de esta tesis relaciona los resultados de Beta –es decir, de la pendiente del gradiente latitudinal– con la variación de la disposición a la interacción diferenciada latitudinalmente, representada por Alpha. Aunque se confirma la hipótesis de que la probabilidad de interacción menor generaría mayor divergencia o heterogeneidad cultural, los resultados de Beta según la variación de Alpha no son lineales y presentan interesantes transiciones de fase.

En los primeros niveles de Alpha (entre 0 y 0,1) –a medida que se aproxima a 0– los resultados indican valores de Beta positivo cercano a cero, es decir, un gradiente creciente de diversidad cultural con el aumento de la latitud. En el caso de Alpha=0, se reprodujeron los patrones observados por el modelo de Axelrod, en el cuál no está considerado el gradiente latitudinal en la probabilidad de interacción.

En el rango de valores de alpha cercanos a uno (0 a 0,1), este resultado ya entrega luces sobre la validación del presente modelo de diversidad cultural, en la medida que sin la aplicación del factor ecológico el modelo se comporta como se esperaría según los antecedentes teóricos y empíricos previos.

A medida que Alpha supera el valor 0,15, Beta comienza a resultar negativo, indicando la reproducción del patrón geográfico de diversidad cultural. Esta tendencia tiende a frenarse cuando Alpha alcanza 0,3, en que los valores de Beta obtenidos siguen siendo negativos, pero comienzan a mostrar un menor valor absoluto, revirtiendo la tendencia que llevaba hasta el momento.

Gráfico 13 – Variaciones de Beta Promedio en 10 iteraciones según valores crecientes de Alpha (normalizado)

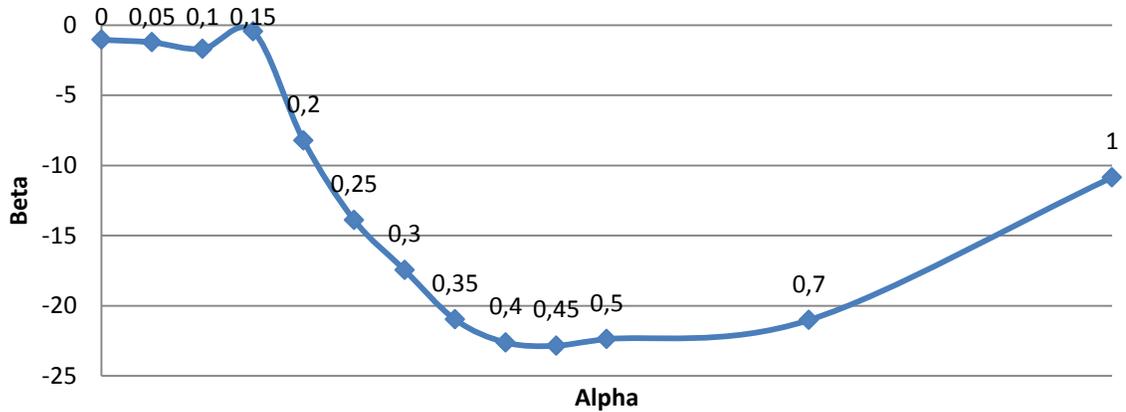


A medida que se incrementa el peso del factor ecológico (Alpha), el gradiente de diversidad cultural (Beta) comienza a generarse claramente. Esto se mantiene en todas las simulaciones, pero cambia su nivel de intensidad. Esto significa que es la importancia del factor ecológico –que reduce la probabilidad de interacción mientras menor sea la latitud– es un factor relevante en la generación de mayor diversidad cultural en la zona ecuatorial y una mayor homogeneidad en las zonas subtropicales.

El gráfico que relaciona los promedios entre Alpha y Beta expone la existencia de tres zonas de sensibilidad. Como es esperable según los resultados de Axelrod, la pendiente tiende a ser muy cercana a cero con una baja importancia del factor ecológico. Esta tendencia se revierte cuando Alpha alcanza y supera el valor 0,15, punto en el que emerge una transición de fase muy clara, incrementando el valor absoluto de la pendiente del gradiente latitudinal de diversidad cultural para alcanzar sus mayores valores en Alpha=0,3. Luego de esto, se produce un segundo cambio de tendencia, con lo que se ingresa a una tercera zona de sensibilidad cuando Alpha alcanza 0,35 o más. Esta tercera zona mantiene la pendiente negativa, pero la asociación con Alpha se hace cada vez menos intensa hasta que se alcanza el valor 1.

El patrón se reproduce de modo robusto con el modelo, ya que con variaciones mínimas, se observan las mismas transiciones de fase extrayendo las pendientes sin normalizar los datos, lo que da lugar a la emergencia de las mismas tres zonas de sensibilidad.

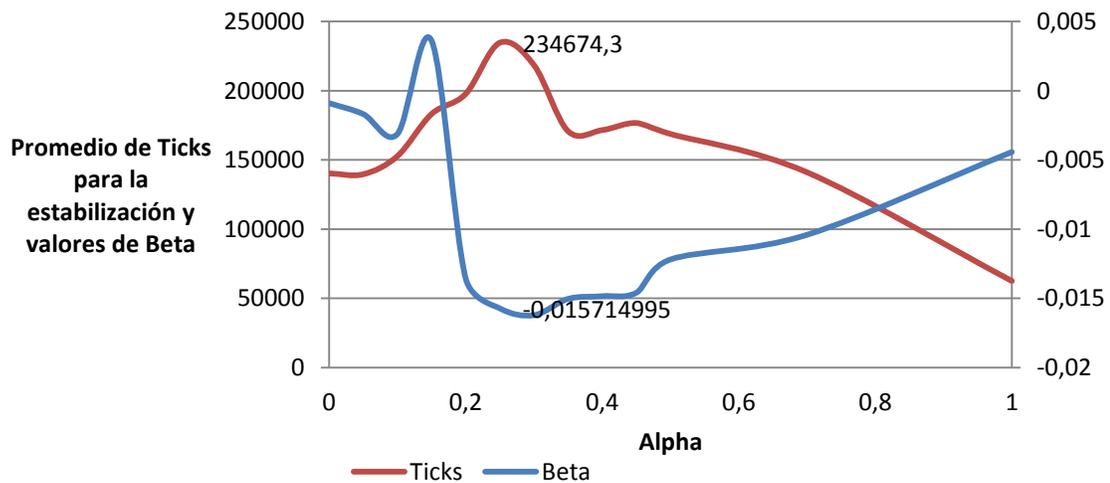
Gráfico 14 – Variaciones de Beta Promedio en 10 iteraciones según valores crecientes de Alpha (sin normalizar)



El punto para el que Alpha exhibe el valor más alto de Beta coincide con que el número de tics (tiempo) necesario para la estabilización del modelo de simulación supera el millón de iteraciones. El tiempo necesario para la estabilización, al reducirse la disposición a la interacción según las condiciones ambientales sean más tropicales, también tiende a ser menor.

Como se observa en el gráfico siguiente, cuando Alpha se encuentra entre 0 y 0,2, el promedio de tics necesarios para la estabilización alcanza su punto máximo (234.674,3 iteraciones, cuando el promedio es de 166.027,0 para todos los valores de Alpha). En este punto se alcanza el valor absoluto máximo de Beta (-0,016).

Gráfico 15 – Promedio de tiempo para la estabilización del modelo y valores de Beta en 10 iteraciones según variaciones de Alpha



Respecto de la estabilización del modelo a mayores niveles de Alpha podría intuirse como hipótesis que el patrón se debilita porque cuando se reduce la probabilidad de interacción con un Alpha mayor o igual a 0,3 la densidad comunicativa es tan baja que el patrón geográfico de diversidad cultural no se reproduce con tanta intensidad, debido a que el número máximo de culturas distintas que se pueden formar en el ecuador no difiere significativamente de las que se logran formar hacia los polos. Si esto fuese efectivo, es el tamaño de la grilla lo que impide la formación de un número de culturas suficientemente divergente entre los tramos de latitud, por lo que será necesario realizar nuevos experimentos cambiando el tamaño de la grilla.

De todos modos, la hipótesis de que el patrón geográfico se explica por constricciones ambientales a la probabilidad de comunicación parece verificarse. En las latitudes más bajas se reduce más la densidad comunicativa (por la menor probabilidad de interacción). Así, se tienden a configurar una mayor cantidad de culturas compactas y diversas entre sí en el trópico, mientras que se hacen más extensas y homogéneas en los polos.

## 10 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El objetivo general de la presente tesis era responder a la pregunta por los efectos de la probabilidad diferenciada de comunicación en las estructuras macrosociales. Para ello, se modificó el modelo de diseminación cultural de Axelrod y se le incorporó la probabilidad diferenciada de interacción según un gradiente latitudinal. Con esta estrategia, se buscó explicar cómo la generación del patrón geográfico de diversidad cultural depende de las condiciones diferenciadas en la probabilidad de interacción comunicativa.

La adaptación del modelo resultó exitosa y se consiguió la reproducción de la diversidad cultural según el patrón geográfico reportado en la literatura. Sin embargo, al tratarse de un fenómeno social complejo, los resultados emergentes de los experimentos computacionales generaron distribuciones no esperadas y muy difíciles de predecir en base al sentido común.

En síntesis, los resultados hablan de un resultado robusto, que implican la diversidad cultural a la existencia de condiciones ambientales que predisponen de manera diferenciada a la interacción entre sistemas culturales. De hecho, este patrón –caracterizado por un gradiente negativo de diversidad cultural según latitud– se repite en los resultados de Beta (pendiente) normalizada y sin normalizar, con diferencias mínimas. Sin embargo, la relación entre Alpha y Beta no es lineal y presenta dos transiciones de fase, dando lugar a tres distintas zonas de sensibilidad.

Como era esperable, cuando Alpha o el peso del factor ecológico es igual a 0, se reproducen los resultados de Axelrod: se produce convergencia global y polarización global sin distinción de localización geográfica. Esta condición se mantiene en los valores bajos de Alpha (menores o iguales a 0,15). Llama la atención, sin embargo, que para valores de Alpha entre  $\approx$  y 0,15 no se marque ninguna tendencia en términos del gradiente latitudinal de diversidad cultural.

El resultado emergente más sorprendente ocurre entre los valores  $\alpha$  entre 0,15 y  $\alpha$  0,2. En este intervalo existe un umbral que caracteriza una transición de fase desde zona de insensibilidad a una zona de fuerte sensibilidad, lo que es un comportamiento típico de los sistemas complejos y que, por tanto, requiere ser discutido y explicado.

Finalmente, existen una tercera zonas de sensibilidad comprendida entre los alores de  $\alpha$  0,3 a 1,0 es positiva. En este intervalo, se revierte la intensa tendencia de aumento de la pendiente del gradiente latitudinal de diversidad cultural, en la medida que comienza a descender en intensidad hasta que  $\alpha$  alcanza el valor 1. Sin embargo, el patrón sigue robusto con una pendiente negativa, pero ya no presenta la intensidad que presentaba cuando el valor de  $\alpha$  oscilaba entre 0,2 y 0,3.

Como se sugirió en el análisis de resultados, esta disminución de la intensidad del gradiente a mayores niveles de  $\alpha$ , se intuye la hipótesis que el patrón se debilita porque con la reducción de la probabilidad de interacción la densidad comunicativa es tan baja que el patrón geográfico de diversidad cultural no se reproduce con tanta intensidad. Lo que estaría ocurriendo es que debido a que el número máximo de culturas distintas que se pueden formar en el ecuador no alcanza a diferir lo suficiente de la diversidad que se forma en la zona subtropical.

La nueva hipótesis es que el tamaño del territorio podría estar influyendo en la formación del gradiente latitudinal al impedir la formación de un número de culturas significativamente distinto entre distintas latitudes. La realización de los experimentos proyectados en que se simulen las variaciones  $\alpha$  para distintos tamaños de grilla pueden otorgar luces respecto al comportamiento complejo entre la relación entre el factor ecológico en la probabilidad de interacción y el gradiente latitudinal de diversidad cultural.

Volviendo a los objetivos de la investigación, es posible decir que se alcanzó el objetivo general de estudiar la relación entre la densidad comunicacional y la diferenciación socio-cultural en contextos sociales estructuralmente acoplados con el ambiente mediante un modelo basado en agentes. La teoría de la evolución sociocultural luhmanniana, la psicología evolucionista y la ciencia generativa fueron elementos clave para la consecución del objetivo general. Es posible afirmar que el objetivo fue logrado en la medida que se cumplieron los objetivos específicos de construir un modelo para estudiar la relación entre diversidad cultural y probabilidad de interacción, lo que permitió a su vez evaluar la influencia de esta disposición diferenciada según latitud en varios niveles de importancia del factor ecológico que probabiliza de manera distinta la interacción. Asimismo, al haber incluido la anulación del factor ecológico de probabilización diferenciada de interacción ( $\text{Alpha}=0$ ), el modelo permitió comparar sus resultados con los análisis de previos de Axelrod.

Al menos con lo que se puede deducir del presente “modelo 0” de probabilidad diferenciada de interacción, la hipótesis general se verifica: El patrón geográfico de diversidad cultural se explica por la relación ecológica entre las condiciones ambientales diferenciadas por latitud y la probabilidad de interacción entre culturas. Esto implica que a menor latitud –por diversos motivos como la concentración de patógenos o la disponibilidad diferenciada de alimentos– se reduce la probabilidad de la interacción entre las unidades culturales, reduciendo y la densidad comunicacional. Esta reducción cuantitativa en términos de cantidad de interacciones tiene como consecuencia el incremento de la diversidad cultural. En términos teóricos, una mayor densidad comunicativa –cantidad de interacciones– favorece la convergencia en la evolución sociocultural.

Respecto de las hipótesis específicas, si bien tienden a verificarse, emergieron una serie de resultados que fueron previstos –y por ello, no fueron formalizados en como hipótesis– al momento de plantear la investigación. Por una parte, se verifica que la diversidad cultural en condiciones diferenciadas de densidad

comunicacional disminuye con el aumento de la probabilidad de interacción, en la medida que las pendientes tendían a ser negativas cuando Alpha alcanza valores significativamente distintos de 0. Existe, por tanto, un umbral de sensibilidad muy baja entre los valores bajos de Alpha, incluso obteniendo algunas pendientes positivas, tendencia que se revierte y se intensifica desde  $\text{Alpha}=0,2$ .

Adicionalmente, se comprobó que la relación entre la probabilidad de interacción comunicativa y el gradiente latitudinal de diversidad cultural presenta un comportamiento no lineal. Esto era esperable en la medida que la teoría indicaba que lo que se modeló corresponde a un sistema social complejo. Sin embargo, ni desde la teoría ni desde la intuición fue posible predecir que la relación entre el valor de Alpha y el valor absoluto de Beta tendría tres zonas de sensibilidad tan distintas (neutra, negativa intensa y positiva más débil). Aunque esta tesis dejó planteada una nueva hipótesis al respecto, futuras simulaciones del modelo en investigaciones ulteriores deberán abordar esta pregunta de modo más sistemático.

Finalmente, tanto como hipótesis verificada como también como medio de validación del modelo, se comprobó que existe una correspondencia entre el modelo de diseminación cultural de Axelrod cuando la disposición diferenciada a la interacción tiende a cero. Esto significa que suprimiendo la influencia del factor ecológico, no se generan diferencias en la distribución geográfica de la diversidad cultural. Esta constatación permite atribuir la generación del gradiente latitudinal al efecto de la importancia del factor ecológico que improbabiliza la interacción comunicativa en las zonas más cercanas al trópico y no al efecto de otras variables aleatorias.

El propósito práctico de esta tesis es más bien restringido, vinculado a la promoción de la investigación social por medio del modelamiento computacional, así como buscar contribuir a la generación de un programa de investigación científico empírico para la teoría sociológica de Luhmann. Sin embargo,

extendiendo el argumento sería posible extraer de estos resultados una recomendación para la política internacional: si se tiene el objetivo de evitar o reducir la polarización cultural –para aminorar así conflictos bélicos, discriminación, intolerancia cultural y otras situaciones que afectan los derechos humanos de personas de culturas diferentes a nivel global– podría sugerirse el establecimiento de mecanismos de interacción cultural allí donde la convergencia cultural es menor.

Finalmente, y volviendo a la teoría de la sociedad de Luhmann, esta tesis contribuye a complementar no sólo la concepción de la evolución sociocultural por medio de un mecanismo de experimentación, sino que impone a la teoría la necesidad de ampliarse para considerar no sólo el tipo o cualidad de interacción que se produzca entre los sistemas sociales. Es por ello que futuras interpretaciones de la teoría social luhmanniana deberán preocuparse de la cantidad de interacciones, según una determinada probabilidad. Este es probablemente el resultado más relevante de la presente tesis: sabemos desde Luhmann que la generación de semánticas socioculturales compartidas estabilizadas y consolidadas es improbable. Ahora bien, la presente investigación demuestra que la forma de estabilización no es aleatoria, sino que depende de la probabilidad diferenciada de interacción comunicativa.

## BIBLIOGRAFÍA

### Fundamentos teóricos, epistemológicos y metodológicos

- Archer, M. (1995) *Realist Social Theory: The Morphogenetic Approach*. Cambridge University Press.
- Arnold., M (2003) *Fundamentos del Constructivismo Sociopoiético*. *Cinta de Moebio*, diciembre, N. 018. Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Chile.
- Arnold., M. (1997) *Introducción a las Epistemologías Sistémico/Constructivistas*. *Cinta de Moebio*, diciembre, N. 2. Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Chile.
- Berger, P. & Luckmann, T. (1994) *La construcción social de la realidad*. Amorrortu editores, Buenos Aires.
- Blanco, C. (2005) *Constructivismo Biológico ¿Una alternativa al realismo?* *Cinta de Moebio*, marzo, N. 022. Universidad de Chile, Santiago. ISSN (versión en línea): 0717-554X.
- Blanco, C. Cabrera, A. Gaete, T. & Pinilla. J. (2011) *La evolución del constructivismo (desde una perspectiva constructivista)*. *Rev. Mad*. N° 23, Septiembre de 2010. pp. 43-54
- Giraldo, G. (2004) *Hacia una epistemología evolucionista*. *Cinta de Moebio*, diciembre, N. 020. Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Chile.
- Haines, V. (2007) *Evolutionary Explanations*. En *Philosophy of Anthropology and Sociology* (Turner, S. y Risjord, M. editores), Elvsevier, New York.
- Hechter, M. & Horne, C. (2003) *The Problem of Social Order*. En *Theories of Social Order: A Reader* (Hechter y Horne editores), Stanford University Press.
- Kroeber, A. (1975) *Lo Superorgánico*. En *El concepto de Cultura: Textos fundamentales* (Kahn, T.S. editor). Editorial Anagrama, Barcelona.
- Maldonado, C. (2009) *Complejidad de los Sistemas Sociales: Un reto para las ciencias sociales*. *Cinta de Moebio* 36:146-157.

- Mascareño, A. (2008) Acción, Estructura y Emergencia en la Teoría Sociológica. *Revista de Sociología* 22. Fac. Ciencias Sociales, U. de Chile.
- Morin, E. (1986) El Método 3: El Conocimiento del Conocimiento. Editorial Cátedra. Colección Teorema, Madrid.
- Mundó, J. (2005) Integración causal en la explicación científica: Ciencia social con y sin psicología. *LUDUS VITALIS*. Vol. 13, N.24.
- Razeto-Barry, P. Cienfuegos-Illanes, J. (2011) La paradoja de la probabilidad de lo improbable y el pensamiento evolutivo de Niklas Luhmann. *Convergencia. Revista de Ciencias Sociales*, vol. 18, núm. 57, septiembre-diciembre, pp. 13-38.
- Ritzer, G. (1997) Teoría Sociológica Contemporánea. McGraw Hill, Madrid.
- Salles, V. (2001) El Debate Micro-Macro: Dilemas y Contextos. *Perfiles Latinoamericanos*, junio, número 018. FLACSO, México D.F., pp. 115-151. ISSN (Versión Impresa): 0188-7653.
- Tönnies, F. (1947) Comunidad y Sociedad. Traducción de José Rovira Armengol. Editorial Losada S.A., Buenos Aires.

### **Ecología cultural**

- Cashdan, E. (2001) Ethnic Diversity and Its Environmental Determinants: Effects of Climate, Pathogens, and Habitat Diversity. *American Anthropologist* 103:4, 968-991
- Collard, I. & Foley, R. (2002) Latitudinal patterns and environmental determinants of recent human cultural diversity: do humans follow biogeographical rules? *Evolutionary Ecology Research* 4:371-383.
- Currie, T. & Mace, R. (2009) Political complexity predicts the spread of ethnolinguistic groups. *PNAS*, Vol. 106, N. 18, 7339–7344.
- Fincher, C. & Thornhill, R. (2008) Assortative sociality, limited dispersal, infectious disease and the genesis of the global pattern of religion diversity. *Proc. R. Soc. B* 2008 275, 2587-2594. DOI: 10.1098/rspb.2008.0688.

- Fincher, C., Thornhill, R., Murray, D., & Schaller, M. (2008) Pathogen prevalence predicts human cross-cultural variability in individualism/collectivism. *Proc. R. Soc. B*, 2008 275, 1279-1285. DOI: 10.1098/rspb.2008.0094.
- Moore, J., Manne, L., Brooks T., Burgess, N., Davies, R., Rahbek, C., Williams, P. & Balmford, A. (2002) The distribution of cultural and biological diversity in Africa. *Proc. R. Soc. Lond. B* 269, 1645-1653. DOI: 10.1098/rspb.2002.2075
- Nettle, D. (1996) Language diversity in West Africa: an ecological approach. *J. Anthropol. Archaeol.* 15, 403–438.
- Nettle, D. (1998) Explaining global patterns of language diversity. *J. Anthropol. Archaeol.* 17, 354–374.
- Nettle, D. (2009) Ecological influences on human behavioural diversity: a review of recent findings. Review. Cell Press. *Trends in Ecology and Evolution.* Vol. 24, N. 11.
- Quinlan, R. (2007) Human parental effort and environmental risk. *Proc. R. Soc. B* 274, 121–125. DOI: 10.1098/rspb.2006.3690
- Schaller, M. & Murray, D. (2008) Pathogens, Personality, and Culture: Disease Prevalence Predicts Worldwide Variability in Sociosexuality, Extraversion, and Openness to Experience. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 95, No. 1, 212–221. DOI: 10.1037/0022-3514.95.1.212.

### **Psicología evolucionista**

- Dawkins, R. (2006) *The Selfish Gene*. Oxford University Press, New York.
- Haidt, J. (2007) The New Synthesis in Moral Psychology. *SCIENCE* Vol. 316, páginas 998-1001. [www.sciencemag.com](http://www.sciencemag.com).
- Kincaid, H. (2007) Functional Explanation and Evolutionary Social Science. En *Philosophy of Anthropology and Sociology* (Turner, S. y Risjord, M. editores), Elvsevier, New York.

- Lewens, T. (2007) Cultural Evolution. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/evolution-cultural>.
- Pinker, S. (2006) The Blank State. *The General Psychologist* Vol. 41, Nº1. [http://pinker.wjh.harvard.edu/articles/papers/The\\_Blank\\_Slate\\_General\\_Psychologist.pdf](http://pinker.wjh.harvard.edu/articles/papers/The_Blank_Slate_General_Psychologist.pdf).
- Tooby, J. & Cosmides, L. (1992) The Psychological Foundation of Culture. En *The Adapted Mind: Evolutionary Psychology and the Generation of Culture* (Barkow, J., Tooby, J. y Cosmides, L.). Oxford University Press, New York.

### **Modelos y simulaciones computacionales**

- Axelrod, R. (1997) The Dissemination of Culture. *Journal of Conflict Resolution* 41 (2) 203-226.
- Baker, A. (2010) Simulation-Based Definitions of Emergence. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 13 (1) 9 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/9.html>
- Ball, P. (2000) Culture Vultures. *Nature Science Update*. Oct 11.
- Barber, M., Blanchard, P., Buchinger, E., Cessac, B. & Streit, L. (2006) Expectation-Driven Interaction: a Model Based on Luhmann's Contingency Approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 9, N. 4.
- Beltrán, F., Herrando, S., Ferreres, D., Adell, M., Estreder, V. & Ruiz-Soler, M. (2009) Forecasting language shift based on cellular automata. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 12 (3) 5. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/3/5.html>
- Castellano, C.; Marsili, M., and Vespignani, A. (2000) Nonequilibrium Phase Transition in a Model for Social Influence. *Physical Review Letters*. Oct 16; 85(16):3536-3539.

- Cioffi-Revilla, C. (2010) A Methodology for Complex Social Simulations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 13 (1) 7 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/7.html>
- Dittrich, P., Kron, T. & Banzhaf, W. (2003) On the Scalability of Social Order: Modeling the Problem of Double and Multi Contingency Following Luhmann. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* V. 6, N. 1 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/1/3.html>>
- Epstein, B. & Axtell, R. (1996) Growing Artificial Societies: Social Science from the bottom up. The Bookings Institutions. Washington DC.
- Epstein, J. (1999) Agent-Based Computational Models and Generative Social Science. *Complexity*. John Wiley & Sons, Inc., Vol. 4, No. 5. CCC 1076-2787/99/05041-20
- Epstein, J. (2008) Why Model? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 11, no. 4 12 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/12.html>
- Greig, M. (2002) The End of Geography? Globalization, Communications, and Culture in the International System. *Journal of Conflict Resolution*. Apr; 46(2):225-243.
- Kennedy, J. (1998) Thinking is Social: Experiments with the adaptive culture model. *Journal of Conflict Resolution*. Feb; 42(1):56-76.
- Leydesdorff (2005) Anticipatory Systems and the Processing of Meaning: A Simulation Study Inspired by Luhmann's Theory of Social Systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* V. 8, N. 2 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/2/7.html>>
- Leydesdorff, L. (2010) Luhmann Reconsidered: Steps Towards an Empirical Research Programme in the Sociology of Communication? En *Beyond Universal Pragmatics: Essays in the Philosophy of Communication* (Colin Grant, editor). Oxford: Peter Lang.
- Lustick, I. (2000) Agent-based modeling of collective identity: testing constructivist theory. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*.
- Osipian, A. (2008) The World is Flat: Modelling Educator's Misconduct with Cellular Automata. Vanderbilt University. *Munich Personal RePEc Archive*.

- Phan, D. & Varenne, F. (2010) Agent-Based Models and Simulations in Economics and Social Sciences: From Conceptual Exploration to Distinct Ways of Experimenting. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 13 (1) 5 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/5.html>
- Sasaki, Y. & Box, P. (2003) Agent-Based Verification of von Thünen's Location Theory. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 6, no. 2 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/9.html>>
- Shannon, C. (1948). A Mathematical Theory of Communication, *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423 y 623-56.
- Shibanaï, Y., Yasuno, S., and Ishiguro, I. (2001) Effects of Global Information Feedback on Diversity. *Journal of Conflict Resolution*. Feb; 45(1):80-96.
- Thompson, N. & Derr, P. (2009) Contra Epstein, Good Explanations Predict. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 12 (1) 9 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/1/9.html>>
- Vivanco, M. (2010) Sociedad y Complejidad: del discurso al modelo. LOM Editorial. ISBN: 978-956-00-01. Santiago de Chile.
- Von Neumann, J. (1966) The Theory of Self-reproducing Automata, ed. Univ. of Illinois Press, Urbana.
- Weaver I. & Raine D. (2010) Replication of Robert Axelrod's model of cultural dissemination, as in "The Dissemination of Culture: A Model with Local Convergence and Global Polarization". Netlogo User Community (<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/community/DisseminationofCulture>).
- Wolfram, S. (1986) Theory and Application of Cellular Automata, *World Scientific*, Singapur.

## ANEXOS

### Programación del Modelo en Netlogo

```
patches-own [culture walls cluster]
globals [this-cluster max-cluster num-cluster count-stability
previous-num-cluster previous-max-cluster stability-max center
gradient-columns]

to setup
  clear-all
  set stability-max 10
  set center ( int ((max-pycor + 1) / 2) )
  set gradient-columns 20
  setup-grid
  setup-patches
  setup-links
  setup-walls
  setup-turtles
  setup-gradient
end

to go
  tick
  update-patch
  do-gradient
  if ticks mod sample-interval = 0
  [
    update-plot
    if check-end?
    [
      ; do-record-data
      stop
    ]
  ]
end

to setup-grid

end
```

```

to setup-patches
  let x 0
  let y 0
  set-default-shape turtles "square"
  repeat world-height
    [
      set x 0
      repeat world-height
        [
          ask patch x y
          [
            sprout 1 [setxy xcor ycor set color black set size 0.2]
            set pcolor white
            set culture []
            repeat num-features
              [
                set culture fput random num-traits culture
              ]
          ]
          set x x + 1
        ]
      set y y + 1
    ]
end

```

```

to setup-links
  ask turtles
  [
    create-links-with turtles-on neighbors4
    [
      set color black
      set thickness 0.2
    ]
  ]
end

```

```

to setup-walls
  let a1 0 ; 1..2
  let a2 0 ; ....
  let a3 0 ; 4..3
  let a4 0
  ask patches
  [
    ask turtles-here [set a2 who]
    ask turtles-at -1 0 [set a1 who]
  ]
end

```

```

    ask turtles-at 0 -1 [set a3 who]
    ask turtles-at -1 -1 [set a4 who]
    set walls (list link a1 a2 link a2 a3 link a3 a4 link a4 a1)
    update-walls
  ]
end

to setup-turtles
  ask turtles [setxy xcor + 0.5 ycor + 0.5]
end

to update-patch
  let neighbor-positions [[0 1] [1 0] [0 -1] [-1 0]]
  let neighbor random 4
  let culture-A []
  let culture-B []
  let patch-A 0
  let patch-B 0
  let P 0
  let n 0
  let latitude 0
  let pathogen 0

  ask one-of patches
  [
    ;set pcolor gray
    let latitude-relative 0
    set culture-A culture
    set patch-A self
    ask patch-at item 0 (item neighbor neighbor-positions) item 1
(item neighbor neighbor-positions)
    [
      set culture-B culture
      set patch-B self
    ]
    set P similarity culture-A culture-B

    set latitude pycor - center
    if (latitude < 0)
    [
      set latitude latitude + 1
      set latitude abs (latitude)
    ]

    set latitude-relative latitude / (center - 1)
  ]

```

```

    set pathogen 1 - latitude-relative

; print pycor
; print latitude
; print latitude-relative
; print center
; print pathogen
; print "-----"
    if (P > 0 and P < 1) and random-float 1 < (P - (pathogen *
alpha) )
        [
            set n difference culture-A culture-B
            set culture replace-item n culture (item n culture-B)
            update-walls
        ]
    ]
end

to update-walls
    let neighbor-positions [[0 1] [1 0] [0 -1] [-1 0]]
    let culture-A culture
    let culture-B []
    let n 0
    repeat 4
        [
            ask patch-at item 0 (item n neighbor-positions) item 1 (item n
neighbor-positions) [set culture-B culture]
            ask item n walls
                [
                    set color 9.9 * similarity culture-A culture-B
                ]
            set n n + 1
        ]
    ]
end

to update-plot
    find-clusters
    set-current-plot "Connected Regions"
    set-plot-x-range 0 ticks
    set-plot-y-range 0 world-width * world-height
    set-current-plot-pen "Number"
    plotxy ticks num-cluster
    set-current-plot-pen "Largest"
    plotxy ticks max-cluster
end

```

```

to find-clusters
  set max-cluster 0
  set num-cluster 0
  let seed patch 0 0
  ask patches [set cluster nobody]
  while [seed != nobody]
    [
      ask seed
      [
        set cluster self
        set this-cluster 1
        set num-cluster num-cluster + 1
        grow-cluster
      ]
      if this-cluster > max-cluster [set max-cluster this-cluster]
      set seed one-of patches with [cluster = nobody]
    ]
  ifelse (num-cluster = previous-num-cluster and max-cluster =
previous-max-cluster)
    [
      set count-stability count-stability + 1
    ]
    [
      set count-stability 0
    ]
  set previous-num-cluster num-cluster
  set previous-max-cluster max-cluster

end

to grow-cluster
  ask neighbors4 with [(cluster = nobody) and (culture = [culture]
of myself)]
  [
    if cluster = nobody [set this-cluster this-cluster + 1]
    set cluster [cluster] of myself
    grow-cluster
  ]
end

to-report check-end?
  let end? true
  ask links
  [

```

```

    if color > 0 and color < 9.9 [set end? false]
  ]

  if count-stability >= stability-max
    [
      set end? true
    ]

  report end?
end

to-report similarity [list-A list-B]
  let n 0
  let l length list-A
  let similarities 0
  repeat l
    [
      if item n list-A = item n list-B [set similarities
similarities + 1]
      set n n + 1
    ]
  report similarities / l
end

to-report difference [list-A list-B]
  let n 0
  let differences []
  repeat length list-A
    [
      if item n list-A != item n list-B [set differences lput n
differences]
      set n n + 1
    ]
  report item (random length differences) differences
end

to-report cultures-in-latitude
  let lista []
  let ini-pycor 0
  let end-pycor 0
  let inc-pycor 1
  repeat max-pycor [
    set ini-pycor end-pycor
    set end-pycor ini-pycor + inc-pycor
  ]

```

```

        repeat length remove-duplicates [culture] of patches with [
pycor >= ini-pycor and pycor <= end-pycor ]
    [
;        set lista lput (ini-pycor ) lista
        set lista lput ((ini-pycor + end-pycor ) / 2) lista
    ]
    ]
    report lista
end

```

```

to setup-gradient
    set-current-plot "Geographical Gradient"
    set-plot-x-range 0 max-pycor
    ;set-plot-y-range 0 count turtles
    set-histogram-num-bars max-pycor
    do-gradient
end

```

```

to do-gradient
    set-current-plot "Geographical Gradient"
    histogram cultures-in-latitude          ; using the default plot
pen
end

```