

Universidade de São Paulo
Instituto de Psicologia
Departamento de Psicologia Experimental

MÁRCIO JOLHBEN WU

Análise do efeito do investimento inicial no
dilema do prisioneiro contínuo iterado simultâneo e
alternado na presença e ausência de ruído
em diferentes cenários de incerteza:
contrapondo as estratégias RTS e LRS por meio da
simulação baseada em agente

VERSÃO CORRIGIDA

São Paulo
2015

MÁRCIO JOLHBEN WU

Análise do efeito do investimento inicial no dilema do prisioneiro contínuo iterado simultâneo e alternado na presença e ausência de ruído em diferentes cenários de incerteza: contrapondo as estratégias RTS e LRS por meio da simulação baseada em agente

Tese apresentada ao Instituto de Psicologia da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Psicologia.

Área de Concentração:
Psicologia Experimental

Orientador:
Prof. Dr. José de Oliveira Siqueira

São Paulo
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Catálogo na publicação
Biblioteca Dante Moreira Leite
Instituto de Psicologia da Universidade de São Paulo

Wu, Márcio Jolhben.

Análise do efeito do investimento inicial no dilema do prisioneiro contínuo iterado simultâneo e alternado na presença e ausência de ruído em diferentes cenários de incerteza: contrapondo as estratégias RTS e LRS por meio da simulação baseada em agente/ Márcio Jolhben Wu; orientador José de Oliveira Siqueira. -- São Paulo, 2015.

210 f.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Psicologia. Área de Concentração: Psicologia Experimental) – Instituto de Psicologia da Universidade de São Paulo.

1. Evolução Social 2. Teoria dos Jogos Evolucionária 3. Cooperação 4. Altruísmo 5. Netlogo 6. *Raise-the-Stakes* 7. Linear I. Título.

BF181

FOLHA DE APROVAÇÃO

Márcio Jolhben Wu

Análise do efeito do investimento inicial no dilema do prisioneiro contínuo iterado simultâneo e alternado na presença e ausência de ruído em diferentes cenários de incerteza: contrapondo as estratégias RTS e LRS por meio da simulação baseada em agente

Tese apresentada ao Instituto de Psicologia da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Psicologia.

Área de Concentração: Psicologia Experimental

Tese defendida e aprovada em: ____/____/____

Orientador(a)

Prof.(a) Dr. José de Oliveira Siqueira _____

Instituição: IP - USP _____ Assinatura: _____



Banca Examinadora

Prof.(a) _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof.(a) _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof.(a) Dr.(a) _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof.(a) Dr.(a) _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

À minha querida esposa pelo seu apoio e amor incondicionais.

AGRADECIMENTOS

Esta tese não seria possível sem a ajuda e a contribuição de inúmeras pessoas e instituições.

Primeiramente, um agradecimento especial ao meu orientador, prof. José Siqueira, cujo apoio, paciência, tempo, amizade e encorajamentos contínuos e iterados foram cruciais na elaboração e conclusão da pesquisa.

Ao prof. Eduardo Ottoni pela sua generosidade em compartilhar o seu conhecimento.

À querida Sonia Maria Caetano de Souza pela sua enorme paciência e dedicação para com todos do Programa de pós-graduação da Psicologia Experimental.

Aos profs. Marcelo Benvenuti e Ronaldo Fiani que puderam participar da banca de qualificação e trouxeram importantes contribuições para este trabalho.

À Rachel, minha colega e amiga de doutorado, pela sua amizade e sua alegria.

À prof. Briseida Dôgo de Rezende, ao José Henrique, ao Tiago Falótico e ao Angelo Augusto Silva Sampaio pelas boas conversas acadêmicas e importantes dicas.

Ao Edson Jun Hashimoto pela ajuda com a língua inglesa.

Ao Wall Hattori pelos ótimos *insights* e por ter me recebido tão bem em Natal.

À Vilma Maria Rodrigues Miranda e ao pessoal da secretaria do PSE pelo suporte.

À FECAP por disponibilizar a sua estrutura para algumas reuniões de orientação e por incentivar e apoiar os seus docentes a se qualificarem cada vez mais.

“Matemática sem a história natural é estéril, mas a história natural sem a matemática é confusa.”

John Maynard Smith

WU, M. J. Análise do efeito do investimento inicial no dilema do prisioneiro contínuo iterado simultâneo e alternado na presença e ausência de ruído em diferentes cenários de incerteza: contrapondo as estratégias RTS e LRS por meio da simulação baseada em agente, 2015. – Instituto de Psicologia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RESUMO

O dilema do prisioneiro é geralmente visto como o ponto de partida para entender o problema da cooperação. Em comparação com o dilema do prisioneiro discreto e iterado, poucos estudos existem sobre o dilema do prisioneiro contínuo e iterado. A maioria dos trabalhos que investigaram o dilema do prisioneiro contínuo e iterado concentrou-se no período de 1990 a 2000, não obtendo resultados conclusivos sobre a melhor estratégia a ser adotada neste tipo de jogo. Duas estratégias diferentes se destacam neste tipo de dilema. A primeira é a estratégia RTS (*Raise-the-Stakes*) de Roberts e Sherratt (1998) que testa o terreno antes de aumentar os investimentos na relação. A segunda deriva do modelo LRS (*Linear Reactive Strategies*) de Wahl e Nowak (1999a). Esta última estratégia estando em equilíbrio de Nash cooperativo apresenta três características: (i) generosidade, i.e., investir o máximo possível no início da relação de cooperação; (ii) otimismo, i.e., contar com o melhor cenário para as próximas rodadas, e (iii) intransigência. Esta pesquisa tem como objetivo principal contrapor as estratégias RTS e LRS num dilema do prisioneiro contínuo e iterado, na presença e ausência de ruído, com jogadas simultâneas e alternadas e para diferentes valores do parâmetro w (probabilidade de interagir novamente). Restringimos a nossa análise a um conjunto de seis estratégias: ALLC, ALLD, TFT, RTS, LRS e RTSM. O método utilizado foi o da simulação baseada em agente (ABM) no formato de torneios, semelhante ao de Axelrod (2006), Roberts & Sherratt (1998), Nowak & Sigmund (1992) e Nowak & Sigmund (1993). Utilizamos o software Netlogo e documentamos todo o processo da concepção e construção do modelo por meio da ferramenta TRACE (*TRANSPARENT and Comprehensive model Evaluation*). Os resultados mostram que as estratégias mais cooperativas são mais favorecidas quando o jogo consiste em jogadas alternadas ao invés de simultâneas. A estratégia RTS teve melhor desempenho em jogos simultâneos para valores intermediários de w , na presença ou ausência de ruído. Por sua vez, a estratégia LRS teve melhor desempenho nos jogos simultâneos, na presença ou ausência de ruído, ou alternados e na presença de ruído, em ambos os casos para valores grandes de w .

Palavras-chave: Evolução Social, Teoria dos Jogos Evolucionária, Cooperação, Altruísmo, Netlogo, Raise-the-Stakes, *Linear Reactive Strategies*, Simulação Baseada em Agente, Investimento Variável, Dilema do Prisioneiro Contínuo Iterado, TRACE (*TRANSPARENT and Comprehensive model Evaluation*).

WU, M. J. **Analysis of the effect of the initial investment in the continuous iterated prisoner's dilemma with simultaneous and alternating moves in the presence and absence of noise in different scenarios of uncertainty: opposing the RTS and LRS strategies through agent-based simulation** 2015. – Instituto de Psicologia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ABSTRACT

The prisoner's dilemma is generally seen as the starting point for understanding the problem of cooperation. In comparison with the discreet and iterated prisoner's dilemma, few studies exist on the continuous iterated prisoner's dilemma. Most of the works that have investigated the continuous iterated prisoner's dilemma has concentrated in the period from 1990 to 2000, not getting conclusive results on the best strategy to be adopted in this type of game. Two different strategies stand out in this kind of dilemma. The first is the RTS strategy (Raise-the-Stakes) of Roberts and Sherratt (1998) that tests the ground before increasing investment in the relationship. The second is the model deriva LRS (Linear Reactive Strategies) de Wahl and Nowak (1999a). This last strategy being in Nash equilibrium cooperative presents three characteristics: (i) generosity, i.e., investing as much as possible at the beginning of the cooperation relationship; (ii) optimism, i.e., rely on the best scenario for the next rounds, and (iii) intransigence. This research has as main goal to reconcile opposing RTS strategies and LRS in a continuous iterated prisoner's dilemma, in the presence and absence of noise, with simultaneous moves and alternate and for different values of the parameter w (probability of interacting again). We restrict our analysis to a set of six strategies: ALLC, ALLD, TFT, RTS, LRS and RTSM (halfway between RTS and LRS). The method used was the agent-based simulation (ABM) in tournament format, similar to that of Axelrod (2006), Roberts (1998), Sherratt & Nowak & Sigmund (1992) and Nowak & Sigmund (1993). We use the NetLogo software and document the whole process of design and construction of the tool model TRACE (TRANSPARENT and Comprehensive model Evaluation). The results show that most strategies are more favoured unions when the game consists of alternating plays rather than simultaneous. The RTS strategy had better performance in simultaneous games for intermediate values of w , in the presence or absence of noise. In turn, the IRS strategy had better performance when simultaneous games, in the presence or absence of noise, or switched, and in the presence of noise, in both cases, for large values of w .

Keywords: social evolution, evolutionary games theory, cooperation, altruism, NetLogo, raise-the-stakes, linear reactive strategies, agent-based modelling, investment variable, continuous iterated prisoner's dilemma, TRACE (*TRANSPARENT and Comprehensive model Evaluation*).

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Estrutura informacional de um jogo (Rasmusen (2001, p. 48))	6
Tabela 2 – Racionalidade do agente do ponto de vista informacional a partir de diversas teorias (extraído de Ormerod & Rosewell, 2009)	17
Tabela 3 - Matriz de recompensas no jogo Falcão-Pomba (elaborado pelo próprio autor)	23
Tabela 4 – A esperança e o desvio-padrão de uma variável aleatória R com distribuição geométrica para diversos valores de w (elaborado pelo autor)	40
Tabela 5 - Diferença entre a visão antiga e nova da seleção de grupos	49
Tabela 6 – Regra de comportamento subjacente a estratégia <i>Raise-the-Stakes</i> (elaborado pelo autor)	64
Tabela 7 – Resumo das investigações sobre a estabilidade da cooperação em sistemas não espaciais com investimento variável (Extraído de Sherratt & Roberts, 2002, p. 47)	68
Tabela 8 – Uma visão geral do protocolo ODD para descrever ABMs (Extraído de Railsback & Grimm, 2012)	86
Tabela 9 – Detalhamento dos elementos relacionados aos conceitos do projeto (Adaptado de Railsback & Grimm, 2012, p. 41)	87
Tabela 10 – Estrutura, terminologia e conteúdo atualizado dos documentos do TRACE (adaptado de Grimm et al., 2014, p. 132)	93
Tabela 11 – Aptidão média e desvio-padrão do jogador focal linha interagindo com o jogador coluna para valores de $b = 4$, $c = 1$, $w = 0,5$ e fitness basal = 1000 em 1000 gerações com 100 rodadas por geração num jogo simultâneo e sem ruído.	130
Tabela 12 – Frequência média de cada estratégia acompanhada do seu respectivo desvio-padrão para valores escolhidos de w	131
Tabela 13 – Aptidão média e desvio-padrão do jogador focal linha interagindo com o jogador coluna para valores de $b = 4$, $c = 1$, $w = 0,5$ e fitness basal = 1000 em 1000 gerações com 100 rodadas por geração num jogo alternado e sem ruído.....	138
Tabela 14 - Variação percentual da aptidão média do jogador focal linha de um jogo simultâneo e sem ruído para um jogo alternado e sem ruído	138
Tabela 15 – Frequência média de cada estratégia acompanhada do seu respectivo desvio-padrão para valores escolhidos de w	141
Tabela 16 - Aptidão média e desvio-padrão do jogador focal linha interagindo com o jogador coluna para valores de $b = 4$, $c = 1$, $w = 0,5$, $p = 0,05$ e fitness basal = 1000 em 1000 gerações com 100 rodadas por geração num jogo simultâneo e com ruído.....	145
Tabela 17 - Variação percentual da aptidão média do jogador focal linha de um jogo simultâneo e sem ruído para um jogo simultâneo e com ruído.....	146

Tabela 18 – Frequência média de cada estratégia acompanhada do seu respectivo desvio-padrão para valores escolhidos de w e p	149
Tabela 19 - Aptidão média e desvio-padrão do jogador focal linha interagindo com o jogador coluna para valores de $b = 4$, $c = 1$, $w = 0,5$, $p = 0,05$ e <i>fitness</i> basal = 1000 em 1000 gerações com 100 rodadas por geração num jogo alternado e com ruído.....	152
Tabela 20 - Variação percentual da aptidão média do jogador focal linha de um jogo alternado e sem ruído para um jogo alternado e com ruído	153
Tabela 21 – Frequência média de cada estratégia acompanhada do seu respectivo desvio-padrão para valores escolhidos de w e p	155

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Matriz de recompensas de um jogo cooperativo para dois jogadores (elaborado pelo próprio autor)	26
Quadro 2 - Matriz de recompensas parametrizadas de um jogo cooperativo para dois jogadores (elaborado pelo próprio autor).....	27
Quadro 3 – Condições definidoras de cada dilema cooperativo para dois jogadores (elaborado pelo próprio autor)	28
Quadro 4 - Matriz de recompensas e análise de equilíbrio do dilema de cooperação total de dois jogadores (elaborado pelo próprio autor)	29
Quadro 5- Matriz de recompensas e análise de equilíbrio do jogo da coordenação de dois jogadores (elaborado pelo autor)	30
Quadro 6- Matriz de recompensas e análise de equilíbrio do dilema do "medroso" de dois jogadores (elaborado pelo autor)	31
Quadro 7 - Matriz de recompensas e análise de equilíbrio do dilema do prisioneiro de dois jogadores (elaborado pelo próprio autor).....	32
Quadro 8 – Matriz de recompensas no dilema do prisioneiro com dois jogadores (elaborado pelo autor)	38
Quadro 9 - Exemplo de uma norma social (elaborado pelo autor).....	44
Quadro 10 - Exemplo de uma regra de ação (elaborado pelo autor).....	45
Quadro 11 - As oito estratégias evolutivamente estáveis (adaptado de Ohtsuki & Iwasa, 2006, p. 438)	46
Quadro 12 - Matriz de recompensas e análise de equilíbrio do dilema do prisioneiro de dois jogadores um exemplo numérico (elaborado pelo próprio autor).....	54

Quadro 13 – Tabela de Recompensas de um dilema do prisioneiro alternado com duas rodadas (elaborado pelo autor)	58
Quadro 14 - Critérios utilizados para classificar as pesquisas sociais (Adaptado de Abramo, 1988)...	76
Quadro 15 – Valores de inicialização dos atributos dos agentes (elaborado pelo próprio autor)	116
Quadro 16 – Resultados de testes de verificação feita no modelo com base em situações de invasibilidade (elaborado pelo próprio autor)	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Jogos com informação perfeita e imperfeita (elaborada pelo próprio autor).....	5
Figura 2 - Diagrama de Venn relacionando equilíbrio de Nash e EEE (elaborado pelo próprio autor)	25
Figura 3 - Elementos de um diagrama ternário e exemplo de um diagrama ternário para o jogo evolucionário Falcão-Pomba-Retaliador (McElreath & Boyd (2007, p. 51)).....	26
Figura 4- Os cinco mecanismos necessários para promover o comportamento cooperativo (Rand & Nowak, 2013, p. 414).....	33
Figura 5 - Evolução de citações anuais a Robert Axelrod (Axelrod, 2006, p. xv).....	37
Figura 6 – Ciclo contínuo entre cooperação e não cooperação (extraído de Nowak, 2006a, p. 91)	42
Figura 7 - Antiga (A) e nova (B) visão da seleção de grupo (West, Griffin & Gardner, 2006).....	48
Figura 8 - Exemplo de Seleção Espacial (Ohtsuki, Hauert, Lieberman & Nowak, 2006).....	52
Figura 9 – O efeito do erro no dilema do prisioneiro iterado com jogadas simultâneas e alternadas (extraído de Nowak e Sigmund (1994)).....	57
Figura 10 – Etapas do ciclo de modelagem no contexto da documentação TRACE (extraído de Schmolke et al., 2010, p. 483).....	90
Figura 11 – Estrutura e terminologia do formato TRACE original, o processo de validação de um modelo e nova estrutura e terminologia proposta (extraído de Grimm et al. 2014, p. 136).....	92
Figura 12 - Impacto de n sobre a probabilidade w mínima para tornar a cooperação estável quando $b=2$ e $c=1$ (elaborado pelo autor)	97
Figura 13 – O ambiente do NetLogo (elaborado pelo próprio autor).....	107
Figura 14 – Tela principal do modelo com as janelas de inspeção de atributos abertas para um agente e para um link (elaborado pelo autor)	110
Figura 15 – Diagrama de fluxo com os principais processos do modelo (elaborado pelo autor)	114
Figura 16 – Evolução das estratégias ALLC, ALLD e TFT num jogo simultâneo (elaborado pelo próprio autor)	127

Figura 17 – Evolução das frequências médias de cada estratégia em função de w para um jogo simultâneo e sem ruído.....	131
Figura 18 – Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas e sem a presença de ruído com $w = 0,10$ (elaborado pelo próprio autor)	132
Figura 19 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas e sem a presença de ruído com $w = 0,30$, respectivamente, até 290 (esquerda) e 2100 (direita) gerações (elaborado pelo próprio autor)	134
Figura 20 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas e sem a presença de ruído com $w = 0,55$ após 2500 gerações (elaborado pelo próprio autor).....	135
Figura 21 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas e sem a presença de ruído com $w = 0,80$ (elaborado pelo próprio autor).....	136
Figura 22 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas e sem a presença de ruído com $w = 0,95$, respectivamente, até aprox. 200 (esquerda) e 820 (direita) gerações (elaborado pelo próprio autor)	137
Figura 23 - Evolução das frequências médias de cada estratégia em função de w para um jogo alternado e sem ruído	140
Figura 24 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas (esquerda) e com Jogadas Alternadas (direita) e sem a presença de ruído com $w = 0$ (elaborado pelo próprio autor).....	142
Figura 25 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas com Jogadas Alternadas e sem a presença de ruído com $w = 0,40$ (elaborado pelo próprio autor).....	143
Figura 26 – Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas (esquerda) e com Jogadas Alternadas (direita) e sem a presença de ruído com $w = 0,95$ (elaborado pelo próprio autor)	144
Figura 27 - Evolução das frequências médias de cada estratégia em função de w e p para um jogo simultâneo e com ruído	147
Figura 28 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas sem (direita) e com a presença de ruído (esquerda) com $w = 0,35$ e $p = 0,07$ (elaborado pelo próprio autor).....	150
Figura 29 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas e com a presença de ruído com $w = 0,95$ e $p = 7\%$ (elaborado pelo próprio autor)	151
Figura 30 - Evolução das frequências médias de cada estratégia em função de w para um jogo alternado e com ruído.....	154

LISTA DE SIGLAS

ABM	<i>Agent Based Modelling</i>
ALLC	<i>Always Cooperates</i>
ALLD	<i>Always Defects</i>
EEE	Estratégia Evolutivamente Estável
IBM	<i>Individual Based Modelling</i>
LRS	<i>Linear Reactive Strategies</i>
ODD	<i>Overview, Design concepts, and Details</i>
RTS	<i>Raise-the-Stakes</i>
RTSM	<i>Raise-the-Stakes Modificado</i>
TFT	<i>Tit-for-Tat</i>
TRACE	<i>TRAnsparent and Comprehensive model Evaludation.</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

b	benefício recebido por conta do ato altruísta
c	custo incorrido por conta do ato altruísta
d	chance basal da cooperação
k	taxa de incremento da chance de cooperação a ser realizado nas próximas rodadas
k_1	taxa de incremento da chance de cooperação a ser realizado nas próximas rodadas relacionado ao outro jogador
k_2^*	taxa de incremento da chance de cooperação a ser realizado nas próximas rodadas relacionado ao jogador focal
p	probabilidade de ocorrer um erro na rodada
q	probabilidade de conhecer a reputação de alguém
r	coeficiente de parentesco
$S_{k,d,x_0}(x)$	resposta de uma dada estratégia focal em função da resposta (x)
$V(E_1 E_2)$	recompensa média obtida pela estratégia focal E1 ao interagir com a estratégia E2
x_0	chance inicial de cooperação.
w	probabilidade de ocorrer uma nova interação entre os mesmos dois indivíduos
W_0	aptidão média basal

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. PRINCIPAIS CONCEITOS DA TEORIA DOS JOGOS	4
2.1 Dominância entre as estratégias e Equilíbrio de Nash	10
2.2 Agente Racional e Teoria da Utilidade	11
3. TEORIA DOS JOGOS EVOLUCIONÁRIA E ESTRATÉGIA EVOLUTIVAMENTE ESTÁVEL	18
3.1 Exemplo de um jogo evolutivo: Falcão-Pomba	21
4. DILEMAS SOCIAIS DE DOIS JOGADORES	26
5. MECANISMOS PARA A EVOLUÇÃO DA COOPERAÇÃO	33
5.1 Seleção por Parentesco	33
5.2 Reciprocidade Direta	35
5.3 Reciprocidade Indireta	42
5.4 Seleção Multinível	47
5.5 Seleção Espacial	50
6. O DILEMA DO PRISIONEIRO E O PROBLEMA DA COOPERAÇÃO	53
6.1 Dilema do prisioneiro de dois jogadores e com uma única rodada	53
6.2 Dilema do prisioneiro alternado e iterado	55
6.3 Dilema do prisioneiro de n jogadores	59
6.4 Dilema do Prisioneiro Contínuo e Iterado	62
7. OBJETIVOS PRINCIPAIS DO TRABALHO	72
8. JUSTIFICATIVA	73
9. METODOLOGIA	76
10. A SIMULAÇÃO COMO MÉTODO CIENTÍFICO	79
11. A DOCUMENTAÇÃO TRACE E O PROTOCOLO ODD	85
11.1 Protocolo ODD	85
11.2 A Documentação TRACE	88
12. O PAPEL DO INVESTIMENTO INICIAL NA EVOLUÇÃO DO COMPORTAMENTO COOPERATIVO – UM EXEMPLO SIMPLES	94
12.1 Resumo	94
12.2 Modelo Proposto	94
13. O PAPEL DO INVESTIMENTO INICIAL E DO RUÍDO NA EVOLUÇÃO DO COMPORTAMENTO COOPERATIVO – DETALHAMENTO MATEMÁTICO DOS PRINCIPAIS MODELOS DA LITERATURA E A SUA UTILIZAÇÃO NA SIMULAÇÃO	98
13.1. <i>Linear Reactive Strategies</i> (LRS) de Wahl e Nowak (1999a)	98

13.2	<i>Raise-the-Stakes</i> (RTS) de Roberts e Sherratt (1998)	101
13.3	<i>Raise-the-Stakes-Modificado</i> (RTSM) de Roberts e Renwick (2003)	102
13.4	Modelando o ruído no Dilema do Prisioneiro Contínuo e Iterado	103
14.	NETLOGO E A FERRAMENTA TRACE DO MODELO PROPOSTO	104
14.1.	NetLogo e seu ambiente de programação – aspectos gerais	104
14.2.	TRACE do modelo.....	107
14.2.1.	Descrição do Modelo ou protocolo ODD do modelo.....	108
14.2.1.1	Propósito do Modelo	108
14.2.1.2.	Entidades, Variáveis de Estado e Escalas	108
14.2.1.3.	Visão geral dos processos e seu sequenciamento no jogo simultâneo com e sem ruído	110
14.2.1.4.	Visão geral dos processos e seu sequenciamento no jogo alternado com e sem ruído	112
14.2.1.5.	Atributos do projeto	114
14.2.1.6.	Inicialização	116
14.2.1.7.	Dados de Entrada	117
14.2.1.8.	Submodelos	117
14.2.2.	Avaliação dos Dados	120
14.2.3.	Avaliação do Modelo Conceitual	121
14.2.4.	Verificação da Implementação.....	122
15.	RECONCILIANDO OS MODELOS NÃO ESPACIAIS COM INVESTIMENTO VARIÁVEL POR MEIO DA SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTE E SEM A PRESENÇA DE RUÍDO.....	129
15.1	Simulando torneios (todos contra todos) com jogadas simultâneas e sem a presença de ruído	129
15.2	Simulando torneios (todos contra todos) com jogadas alternadas e sem a presença de ruído.	137
16.	RECONCILIANDO OS MODELOS NÃO ESPACIAIS COM INVESTIMENTO VARIÁVEL POR MEIO DA SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTE E COM A PRESENÇA DE RUÍDO....	145
16.1	Simulando torneios (todos contra todos) com jogadas simultâneas e com a presença de ruído	145
16.2	Simulando torneios (todos contra todos) com jogadas alternadas e com a presença de ruído	152
17.	DISCUSSÃO GERAL.....	156
18.	CONCLUSÃO	163
19.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167
20.	APÊNDICE A – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES SELECIONADAS	176
21.	APÊNDICE B – DETALHANDO A REGRA DE HAMILTON	178
22.	APÊNDICE C – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO QUADRO 14.....	181

23.	ANEXOS.....	186
-----	-------------	-----

1. INTRODUÇÃO

A revista *Science*, no dia 1º de julho de 2005, a mesma data do seu 125º aniversário, publicou uma matéria elencando as 25 grandes questões que a ciência enfrentará nos próximos 25 anos. Algumas das questões são: Do que o universo é feito? Qual a base biológica da consciência? Até que ponto a variação genética e a saúde pessoal se encontram ligadas? Podem as leis da física serem unificadas? Essas são apenas algumas das perguntas que ainda não têm uma resposta definitiva.

Boa parte dessas 25 grandes questões são reflexos do avanço da ciência ao longo de vários anos, como, por exemplo: Qual é o limite da computação?, mas outras ainda são perguntas tão antigas quanto a própria humanidade, e uma delas se refere à cooperação, mais especificamente: Como a cooperação evoluiu?

Esta mesma pergunta, proposta pela *Science*, apareceu sete anos após, mas agora, na matéria de capa de junho de 2012 da revista *Scientific American* pelo título: Por que nós nos ajudamos: a evolução da cooperação.

Estes dois fatos apenas servem para reforçar a importância e a relevância que este tema teve no passado e continua(rá) tendo no presente e no futuro.

É possível olhar para esta questão com naturalidade, pois exemplos cooperativos são abundantes na natureza e nas sociedades humanas. Mas, esta mesma pergunta sobre a óptica do neodarwinismo, parece contraditória. Já que cooperação e sucesso evolutivo não parecem, à primeira vista, serem os lados de uma mesma moeda.

Como é possível num jogo em que o objetivo final é a sobrevivência e a reprodução, que é o jogo chamado de vida, ter como uma das estratégias possíveis um comportamento que opta em se pôr em risco ou escolher ter o seu sucesso reprodutivo diminuído em prol do sucesso reprodutivo do(s) outro(s)?

Diversas pesquisas e avanços já foram feitas em direção a esta resposta, mas, de acordo com a *Science* e *Scientific American*, várias perguntas permanecem sem uma resposta final, e dentre elas “Como e porquê a cooperação evoluiu?” ainda precisam ser melhor entendidas.

O próprio Charles Darwin via no comportamento cooperativo das abelhas algo central para que a sua teoria pudesse ter credibilidade. No caso das abelhas, o ponto central era explicar a existência de castas estéreis e que, além disso, esses indivíduos incorrerem em custos pessoais

em prol do benefício da colmeia, chegando mesmo a se sacrificar na defesa do grupo (Dugatkin, 2006).

Desta forma, conforme Dugatkin (2006, p. 2), Darwin via o caso das abelhas como de outros insetos eussociais, como vespas e formigas:

“um obstáculo para a sua teoria da seleção natural, que afirma que apenas os traços que aumentassem o sucesso reprodutivo de um indivíduo ao longo das gerações posteriores, aumentariam em frequência, esterilidade e indivíduos kamikazes parecem ser precisamente os tipos de traços que a seleção natural deve operar de forma contrária, e Darwin sabia disso.”

Apesar de Darwin não ter conseguido obter uma resposta conclusiva, talvez pelo desconhecimento de vários detalhes relacionados aos mecanismos da vida, como por exemplo, a herança genética de Mendel. Ele levantou a hipótese de parentesco para explicar o problema das abelhas, mas sem fornecer nenhuma prova para esta suposição. Após Darwin, diversos cientistas se empenharam em procurar as origens da “bondade”. Esta saga é muito bem descrita em Dugatkin (2006).

A hipótese de parentesco de Darwin somente ganhou corpo mais de cem anos depois da publicação da Origem das Espécies, através dos trabalhos de William Donald Hamilton e George Price culminando na teoria da seleção de parentesco.

Esta teoria possibilitou explicar a razão pela qual os organismos aparentados se ajudam ou cooperam.

Mas menos comum do que a cooperação entre aparentados, talvez seja a situação envolvendo indivíduos não aparentados.

Neste caso, como isso pode ser explicado? Qual é o ponto de partida para entendermos o problema da cooperação entre não aparentados? Possíveis respostas podem ser obtidas em diversas áreas do conhecimento, mas grande parte dessas respostas, além daquelas que são as mais promissoras, passam necessariamente pelo terreno da teoria dos jogos (Alencar & Yamamoto, 2008), mais especificamente pelo famoso jogo conhecido como o dilema do prisioneiro.

Segundo Nowak e Highfield (2011, p. 31), “de todos eles (dilemas), o dilema do prisioneiro é de longe o mais difícil de resolver. Você pode pensar nele como o dilema final da cooperação (o grifo é nosso).” No dilema do prisioneiro com uma única rodada, mesmo tendo a possibilidade de optar pela cooperação, sempre será melhor para o prisioneiro optar pela não cooperação com o seu colega e nisto consiste a dificuldade deste dilema.

Assim, entender o dilema do prisioneiro equivale a dar um passo ao entendimento da cooperação entre indivíduos não aparentados. Mas, para entender este dilema, precisamos dos principais conceitos relacionados à teoria dos jogos. Esse será o nosso ponto de partida.

Contudo, o grande problema ao abordarmos a questão da evolução do comportamento cooperativo sob uma dinâmica evolutiva é que, segundo McElreath e Boyd (2007, p. ix):

“A maioria das importantes teorias na biologia evolutiva desenvolvidas nos últimos 50 anos está pelo menos parcialmente na forma matemática, o ‘Latim’ da área; ainda poucos behavioristas que estudam animais e ecólogos comportamentais entendem os modelos evolucionários formais. O problema é mais agudo entre aqueles que utilizam uma abordagem evolutiva para o comportamento humano, como estudantes na antropologia e psicologia (o grifo é nosso).”

Começamos a tese apresentado os principais conceitos relacionados à teoria dos jogos, discutimos, em seguida, o problema da racionalidade na teoria dos jogos e apresentamos a teoria dos jogos evolucionária que se torna uma ferramenta mais apropriada quando admitimos racionalidade limitada dos agentes, i.e., um relaxamento da hipótese da racionalidade ilimitada.

Devidamente munidos da linguagem referente à teoria dos jogos, passamos a abordar os principais dilemas sociais e, dentre eles, o famoso dilema do prisioneiro. Aprofundamos a análise da dificuldade da cooperação neste caso sob as lentes da teoria dos jogos. Além da situação envolvendo dois jogadores, apresentamos também o caso com mais de dois jogadores.

Abordaremos rapidamente os cinco mecanismos para a evolução da cooperação, dentre eles: seleção de parentesco, reciprocidade direta, reciprocidade indireta, seleção multinível e seleção espacial (Nowak, 2011, 2012; Rand & Nowak, 2013).

Por fim, no que tange ao referencial teórico, discutimos o dilema do prisioneiro contínuo iterado, através de uma revisão dos principais trabalhos e modelos propostos até o presente.

2. PRINCIPAIS CONCEITOS DA TEORIA DOS JOGOS

Foi o matemático francês Antoine Augustin Cournot em 1838 com o seu livro *Recherches sur les Principes Mathématiques de la Théorie des Richesses* quem elaborou os elementos importantes do que viria a ser a teoria dos jogos (Fiani, 2009).

Mas, o início de fato é atribuído à publicação da obra de Von Neumann & Morgenstern intitulada *The Theory of Games and Economic Behaviour* em 1944 (Rasmussen, 2001). A sua popularização se deu apenas a partir de 1950 por John F. Nash Jr., John C. Harsanyi e Reinhard Selten, cujos trabalhos foram agraciados com prêmio Nobel de 1994. Uma revisão detalhada da história da teoria dos jogos é encontrada em Luce e Raiffa (1957).

A teoria dos jogos é um método que visa estudar comportamentos estratégicos, que se refere a aquele em que o resultado obtido por um dado jogador é dependente da sua decisão assim como das decisões dos outros jogadores, i.e., existe uma interação entre os jogadores (Fiani, 2009). Somado a isso está o fato de que os indivíduos estão cientes de que suas ações afetam uns aos outros (Bierman & Fernandez, 2011; Rasmusen, 2001; Samuelson, 1997).

Quando pensamos estrategicamente, procuramos antecipar o próximo movimento do nosso adversário, sabendo que ele estará fazendo o mesmo também (Dixit & Nalebuff, 1993).

Assim, a teoria dos jogos estuda como indivíduos racionais tomam decisões quando eles são mutuamente interdependentes (Romp, 1997). Em qual estratégia cada indivíduo irá determinar sua “jogada” ótima na tentativa de alcançar o resultado final mais desejado é o que basicamente resume o conceito de equilíbrio de Nash tratado mais adiante.

Um jogo pode ser classificado com base em diversos critérios, e.g.: número de jogadores, estrutura informacional, ordem das jogadas e “comprometimento” ou vínculo entre os jogadores.

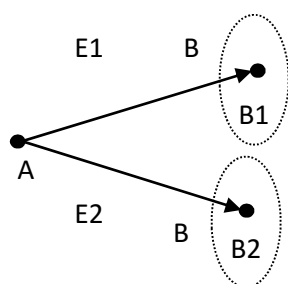
Quando avaliamos um jogo no seu aspecto informacional, podemos ter ainda quatro possibilidades de acordo com Rasmusen (2001): perfeito e imperfeito, completo e incompleto, certo e incerto, simétrico e assimétrico.

Informação neste contexto está associada a ideia de conhecimento comum, ou seja, se ela é de conhecimento de todos os jogadores, e se cada jogador sabe que os jogadores sabem sobre isso, e se cada jogador sabe que todos os jogadores sabem que todos os jogadores sabem sobre isso, e assim por diante. Logo, a informação inicial seria reprocessada infinitamente.

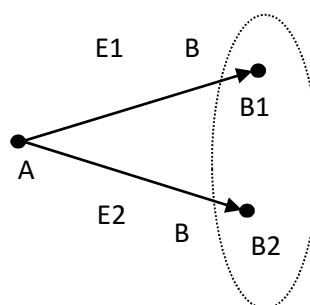
Portanto, o termo conhecimento comum é usado justamente para evitar esta recursão infinita que este raciocínio conduziria (Rasmusen, 2001; Romp, 1997).

Para explicarmos a diferença de um jogo do tipo com informação perfeita e com informação imperfeita, vamos fazer o uso de um exemplo. Escolheu-se o famoso dilema do prisioneiro para isso. Mais detalhes deste dilema serão tratados em capítulos posteriores.

Neste dilema do prisioneiro simplificado, considere que existam dois prisioneiros, A e B, sendo que ambos acabaram de cometer um delito grave, mas as autoridades não têm provas contundentes para condená-los por conta disso, mas sim por um delito de gravidade menor. Visando obter as provas necessárias para a condenação, os dois suspeitos são interrogados separadamente. Cabe a cada prisioneiro, escolher entre delatar o outro prisioneiro, e assim, obter o benefício da delação, ou, simplesmente, não delatá-lo. Diferentemente do jogo original, vamos caracterizar o nosso dilema como sendo um jogo sequencial, ou seja, A toma a sua decisão, seguida por B. Podemos representar este jogo por meio de uma árvore de decisão, e assim, poder explicar a diferença entre os jogos com informação perfeita e imperfeita.



Jogo com informação perfeita



Jogo com informação imperfeita

Figura 1- Jogos com informação perfeita e imperfeita (elaborada pelo próprio autor)

Da figura acima, no caso do jogo com informação perfeita, temos que B, ao tomar a sua decisão, já sabia qual foi a decisão de A, apesar de ter sido mencionado que os prisioneiros são interrogados em celas separadas, suponha que de alguma forma B consiga ter conhecimento da decisão de A antes de tomar a sua decisão. Neste caso, B estará ciente de encontrar-se ou no nó B1 ou no nó B2 da árvore de decisão. Observe que cada nó tem um conjunto informacional unitário, representada pelos círculos pontilhados. Assim, dizemos que um jogo é de informação perfeita se cada conjunto informacional é unitário.

Agora suponha que quando B vai tomar a sua decisão ele ainda desconheça a decisão de A ou que a informação recebida sobre o prisioneiro A seja imperfeita para determinar

perfeitamente a sua decisão. Em outras palavras, B pode estar tanto no nó B1 quanto no nó B2 da árvore de decisão. Nesta nova situação, o conjunto informacional abrangeria os dois nós, B1 e B2, e, portanto, não seria mais um conjunto informacional unitário. Neste caso, o jogo é com informação imperfeita.

Já quando classificamos um jogo com informação simétrica versus assimétrica, a ideia principal aqui é que pelo menos um jogador tem uma informação útil privada. Neste caso temos um jogo assimétrico e, caso contrário, simétrico.

Ao introduzirmos incerteza num jogo, podemos agora recair num jogo incerto ou com incerteza. A principal diferença num jogo com certeza e com incerteza é que, no primeiro, a Natureza ou o Acaso nunca terá um movimento após quaisquer movimentos dos jogadores. Consequentemente, as recompensas de cada um dos jogadores serão determinísticas. Por outro lado, num jogo com incerteza, a recompensa de pelo menos um dos jogadores seria probabilística, ou seja, estaria caracterizado por uma distribuição de probabilidades.

Na teoria dos jogos, a Natureza será considerada um jogador fictício que escolhe ações aleatórias a certa altura do jogo com probabilidades especificadas (Rasmusen, 2001).

Por fim, um jogo é dito de informação incompleta, quando a Natureza, ao ser a primeira a se mover, tem o seu movimento não observado por pelo menos um jogador; caso contrário, o jogo é completo. Assim, podemos dizer que num jogo com informação completa, todos os jogadores possuem os mesmos conjuntos informacionais sobre a Natureza, e num incompleto pelo menos um jogador teria um conjunto deficiente de informações sobre o movimento da Natureza.

Abaixo segue um quadro que resume a classificação de um jogo de acordo com a sua estrutura informacional:

<i>Categoria informacional</i>	<i>Significado</i>
Perfeito	Cada conjunto informacional é um conjunto unitário
Certo	A Natureza não se move depois do movimento de qualquer jogador
Simétrico	Nenhum jogador possui informações diferentes dos outros quando ele se moveu para os nós finais/extremos
Completo	A Natureza não é a primeira a jogar ou seu movimento inicial é observado por todos os jogadores

Tabela 1-Estrutura informacional de um jogo (Rasmusen (2001, p. 48))

A título de exemplificação, o famoso dilema do prisioneiro é classificado como sendo um jogo de informação imperfeita, completa, simétrica e certa (Rasmusen, 2001).

Com relação a ordem das jogadas, podemos ter um jogo com jogadas simultâneas, ou seja, as ações são tomadas simultaneamente por todos os jogadores envolvidos, ou um jogo com jogadas alternadas, ou seja, a escolha do segundo jogador sucede a do primeiro, e assim por diante. Um jogo em que os movimentos são simultâneos é também chamado de jogo estático, e de jogo dinâmico, quando os jogadores se movimentam numa sequência fixa (Bierman & Fernandez, 2011).

A respeito daquilo que denominamos “comprometimento” ou vínculo entre os jogadores, um jogo pode ser cooperativo e não cooperativo. Basicamente, no primeiro, os jogadores têm a possibilidade de se comunicarem e, assim, se comprometerem um com o outro a formular as decisões. Já num jogo não cooperativo, são impedidos de entrarem em acordos ou vínculos um com os outros. É importante salientar que, o fato dos indivíduos não poderem estabelecer acordos ou compromissos, não impede a possibilidade de ocorrer cooperação no jogo, e isso somente ocorreria se os indivíduos enxergassem na cooperação algo que favorecesse os seus próprios interesses.

Nas palavras de Rasmusen (2001, p. 21): “a teoria dos jogos cooperativos é axiomática, frequentemente chamada de ótimo de Pareto, justa e com equidade. Teoria dos jogos não cooperativos é economia no seu sabor, com as soluções baseadas nos jogadores maximizando suas próprias funções de utilidade sujeitas às restrições existentes.”

De acordo com Romp (1997, p.2), “esta abordagem individualista (da abordagem não cooperativa) é claramente consistente com a ênfase dominante dentro da economia neoclássica. Por esta razão a teoria dos jogos não cooperativos tem os maiores impactos dentro do *mainstream* econômico.”

Pereira (2008) explica que, no caso dos jogos cooperativos, a comunicação deve ser precisa, sem erros e sem nenhum custo para os jogadores. Estas vantagens se contrapõem ao fato dos jogadores poderem criar coalizões, ameaças e blefes. Ainda de acordo com Pereira (2008), a comunicação nos jogos não cooperativos é substituída por possíveis sinalizações ou convenções que coordenariam as ações dos jogadores.

É importante salientar a diferença entre o conceito de jogo de conflito e sem conflito com jogos cooperativos e não cooperativos. É comum associarmos a ideia de conflito com não cooperação e vice-versa. Porém, jogos com conflito são aqueles que para um dos jogadores

ganhar o outro necessariamente precisa perder. Um jogo de puro conflito é também conhecido como de soma zero, ou seja, a soma dos ganhos e das perdas obtidas pelos jogadores deve ser igual a zero. Um jogo sem conflito seria aquele em que em decorrência da perfeita compatibilidade de interesses, geraria apenas ganhos para os jogadores.

Para Schelling (1958), o jogo de puro conflito ou de soma zero estaria numa das pontas de uma gama enorme de possibilidades, e na outra ponta, o jogo puro de coordenação, ou de interesses perfeitamente comuns, e no meio destes dois extremos, os jogos com motivações mistas. A título de exemplo, Rasmusen (2001, p. 22) cita alguns exemplos possíveis para combinações entre jogos cooperativos e não cooperativos com os jogos com conflito e sem conflito:

- I) Um jogo cooperativo sem conflito: membros de uma força-tarefa escolhem qual das tarefas igualmente árduas eles devem aceitar para poder estabelecer a melhor coordenação uns com os outros.
- II) Um jogo cooperativo com conflito: negociação de preço entre comprador e vendedor.
- III) Um jogo não cooperativo com conflito: dilema do prisioneiro.
- IV) Um jogo não cooperativo sem conflito: duas empresas definem o padrão para um produto sem poderem se comunicar.

Os elementos essenciais de um jogo são os jogadores, as ações, as recompensas associadas a cada estratégia e as informações (Rasmusen, 2001). O objetivo de cada jogador é maximizar a sua recompensa e para isso, os jogadores estabelecerão estratégias. Logo, uma estratégia é uma regra que diz ao jogador qual a ação a ser escolhida em cada instante do jogo mediante seu conjunto informacional (Rasmusen, 2001). A combinação das estratégias escolhidas por cada jogador resultará no estado final do jogo, ou no seu equilíbrio.

Dentro da teoria dos jogos é de suma importância sabermos como representar cada um dos elementos essenciais do jogo. Para isso escolheu-se Rasmusen (2001) como padrão. A linguagem matemática utilizada por ele é igual ou muito semelhante em artigos ou obras sobre este assunto (Romp, 1997; Fiani, 2009).

Num jogo, cada jogador será representado por um sub-índice i . O conjunto de ações possíveis para este jogador i é dado pelo conjunto $A_i = \{a_i\}$. O conjunto de estratégias disponíveis para ele é $S_i = \{s_i\}$.

Por fim, precisamos definir a função de recompensa do jogador i que irá representar de uma forma geral uma recompensa para ele de acordo com a sua estratégia e as dos demais jogadores. Assim, seja $\pi_i(s_i, s_{-i})$ a recompensa que o jogador i recebe como uma função da estratégia escolhida por ele (s_i) e das estratégias adotadas pelos demais jogadores (s_{-i}), onde o sub-índice $-i$ é uma forma alternativa de se referir a todos os outros jogadores envolvidos com exceção do jogador i .

Para exemplificar os elementos descritos, considere o seguinte jogo: dois indivíduos, por exemplo, Pedro e Ismael, mostram simultaneamente um número de um a cinco, e se a soma desses números for par, então Pedro será o vencedor, e se for ímpar, o vencedor será Ismael. Considere que o vencedor deste jogo receba R\$ 10, enquanto o perdedor, R\$ 0. Vamos associar a Pedro o sub-índice 1, e a Ismael, o de número 2.

Assim, o conjunto de ações tanto de Pedro como de Ismael pode ser representado como $A_1 = A_2 = \{\text{par}; \text{ímpar}\}$, neste caso, por se tratar de um jogo de uma única rodada e simultâneo, o conjunto de estratégias é idêntico ao conjunto de ações. As recompensas para Pedro neste jogo podem ser representadas como: $\pi_1(\text{par}, \text{ímpar}) = \text{R}\0 , $\pi_1(\text{par}, \text{par}) = \text{R}\10 , $\pi_1(\text{ímpar}, \text{ímpar}) = \text{R}\10 e $\pi_1(\text{ímpar}, \text{par}) = \text{R}\0 , sendo que o sub-índice 1 indica Pedro, e a primeira estratégia apresentada para cada uma das quatro funções de recompensa anteriores, se refere primeiramente a Pedro, seguida pela estratégia escolhida por Ismael.

Por sua vez, as recompensas para Ismael neste jogo podem ser representadas como: $\pi_2(\text{par}, \text{ímpar}) = \text{R}\10 , $\pi_2(\text{par}, \text{par}) = \text{R}\0 , $\pi_2(\text{ímpar}, \text{ímpar}) = \text{R}\0 e $\pi_2(\text{ímpar}, \text{par}) = \text{R}\10 , sendo que o sub-índice 2 representa Ismael, e a primeira estratégia apresentada para cada uma das quatro funções de recompensa anteriores, se refere primeiramente a Ismael, seguida pela estratégia de Pedro.

Para elucidar um pouco mais a maneira de representar as recompensas de cada um dos jogadores num jogo, considere que Pedro tenha mostrado um número par, enquanto Ismael, um número ímpar. As representações das funções de recompensa de Pedro e de Ismael nesta situação são, respectivamente, $\pi_1(\text{par}, \text{ímpar}) = \text{R}\0 e $\pi_2(\text{ímpar}, \text{par}) = \text{R}\10 .

Para tratarmos e entendemos adequadamente a evolução do comportamento cooperativo dentro de um escopo evolucionista, ainda é necessário apresentarmos dois conceitos

fundamentais da teoria dos jogos. O primeiro é o conceito de dominância entre as estratégias e o segundo, o equilíbrio de Nash.

2.1 Dominância entre as estratégias e Equilíbrio de Nash

Seja π_i a função de recompensa do jogador i obtida por ele quando interage com os demais jogadores. Imagine que este jogador i possa utilizar, a título de simplificação, apenas duas estratégias contra os demais jogadores, vamos denominá-las, de s_i^* e s_i^{**} . Dizemos que a estratégia s_i^* é estritamente dominante sobre a estratégia s_i^{**} ou que s_i^{**} é estritamente dominada por s_i^* , se:

$$\pi_i(s_i^*, s_{-i}) > \pi_i(s_i^{**}, s_{-i}), \text{ para todo } s_{-i} \quad (1)$$

A desigualdade acima nos diz que para que s_i^* seja uma estratégia estritamente dominante sobre outra s_i^{**} é necessário que quando o jogador i utilizar s_i^* independente do que os outros jogadores fizerem, ele sempre obterá uma recompensa maior do que se ele preferisse utilizar s_i^{**} , i.e., s_i^{**} será sempre uma estratégia inferior a s_i^* independentemente das estratégias utilizadas pelos outros jogadores (s_{-i}).

Outra possibilidade entre s_i^* e s_i^{**} é que s_i^{**} pode ser uma estratégia tão boa quanto s_i^* . Porém, se em pelo menos uma situação s_i^* for melhor do que s_i^{**} , então, dizemos que s_i^{**} é fracamente dominada por s_i^* ou que a estratégia s_i^* é fracamente dominante. Ao representarmos este caso por meio de desigualdades e com o uso de uma função de recompensa, temos:

$$\pi_i(s_i^*, s_{-i}) \geq \pi_i(s_i^{**}, s_{-i}), \text{ para todo } s_{-i} \quad (2)$$

e

$$\pi_i(s_i^*, s_{-i}) > \pi_i(s_i^{**}, s_{-i}), \text{ para algum } s_{-i} \quad (3)$$

O conceito de estratégia dominante e dominada é muito útil para determinarmos situações de equilíbrio por um método chamado de eliminação iterativa de estratégias estritamente dominadas (Fiani, 2009; Rasmusen, 2001; Romp, 1997). Mas, nem sempre o equilíbrio de um jogo acaba sendo encontrado pela utilização desta técnica. Um conceito mais

geral que pode ser empregado para encontrar o equilíbrio em jogos simultâneos é o equilíbrio de Nash.

A ideia principal subjacente ao equilíbrio de Nash é que, dado o pressuposto do agente racional, qualquer jogador sempre escolherá a melhor resposta possível dado as melhores respostas que os outros jogadores poderiam escolher. E assim que todos os jogadores estejam num equilíbrio de Nash, nenhum jogador terá algum incentivo de se desviar deste equilíbrio.

Em termos formais, para que uma combinação de estratégias seja considerada um equilíbrio de Nash é necessário que, para cada estratégia s_i^* que pertença a esta combinação tenhamos:

$$\pi_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq \pi_i(s_i, s_{-i}^*) \text{ para todo } s_i \text{ e todo } i. \quad (4)$$

É importante salientar que o equilíbrio de Nash se refere a uma combinação de estratégias e, conseqüentemente, se refere a todos os jogadores envolvidos no jogo, sendo que, cada um estará adotando a sua melhor estratégia um contra o outro mediante a suposição de conhecimento comum.

2.2 Agente Racional e Teoria da Utilidade

O processo de tomada de decisão dentro de um contexto econômico clássico pressupõe a racionalidade dos agentes e isso baseia-se em duas propriedades básicas deste agente. De acordo com Lesourne, Orléan e Walliser (2002, p. 13), “primeiramente, os agentes são “consequencialistas” no sentido de que eles escolhem sua ação somente considerando as conseqüências (previsíveis); em segundo lugar, eles são “utilitaristas” no sentido que eles avaliam os efeitos da sua ação ponderando os custos e as vantagens.” Ao caracterizar o nosso agente desta maneira, o processo de escolha pode ser entendido mediante três determinantes: suas oportunidades (restringindo as suas ações possíveis), suas representações (capacitando de prever as conseqüências das suas ações) e suas preferências (relacionada à capacidade de julgar suas conseqüências) (Lesourne, Orléan & Walliser, 2002).

Vários livros de microeconomia tratam das propriedades que caracterizariam as preferências de um agente racional, mas a abordagem para explicar a questão das preferências será pautada em Mas-Colell, Whinston e Green (1995).

Uma relação de preferência racional envolve duas principais propriedades:

- I) A relação de preferência sobre um conjunto de escolhas possíveis é sempre completa. Isso significa que sempre será possível ordenar este conjunto numa ordem crescente ou decrescente de preferência;
- II) A relação de preferência sobre um conjunto de escolhas possíveis é transitiva. Isso significa que, dado três escolhas possíveis deste conjunto, e.g., w, z, t; se w for preferível a z e se z for preferível a t, então, por este conjunto obedecer a uma relação transitiva, temos que w é preferível a t.

Segundo Fiani (2009), a hipótese de preferência permite aos jogadores expressar preferência estrita entre duas possibilidades quaisquer ou, pelo menos, torná-lo indiferente. A propriedade de transitividade do conjunto impede que o agente se comporte irracionalmente, sendo que esse fato poderia ser explorado por outros jogadores.

Preferências completas e transitivas são chamadas de preferências ordinais, pois ordenam as preferências dos agentes com relação a determinados resultados (Fiani, 2009).

McClellenn (1990, Cap. 2), citado por Coleman (2003), adiciona uma terceira propriedade que se refere a ideia de ordenação livre de contexto (*context-free ordering*), que equivale à seguinte ideia: se um agente considera x menos preferível a z dentro de um conjunto de escolhas, A, então, este agente ainda considerará x menos preferível a z quando ao conjunto A forem adicionados mais elementos.

Desta forma, um agente racional seria perfeitamente capaz de antecipar os efeitos das suas ações. As consequências destas ações poderiam ser julgadas mediante um critério de custo e benefício, este medido pela utilidade. Por fim, o nosso agente sempre irá procurar maximizar a sua utilidade. Segundo Samuelson (1997, p. 4), “a maximização da utilidade provê uma linguagem conveniente para conduzir a análise econômica.”

Pindyck e Rubinfeld (1995, p. 85) definem utilidade como “nível de satisfação que uma pessoa obtém por consumir um produto ou por realizar uma atividade. Ela (utilidade) tem um importante componente psicológico porque as pessoas procuraram obter utilidade de coisas que lhe causam prazer e evitar coisas que as causariam dor.” Neste sentido utilidade estaria relacionada a bem-estar, prazer ou felicidade, segundo a escola dos utilitaristas (Bowles, 2004).

A utilidade, conforme referida em Pindyck e Rubinfeld (1995), Bowles (2004) e grande parte dos livros de microeconomia, é a utilidade ordinal. Originalmente, propôs-se medir a utilidade de maneira cardinal, ou seja, a que mensuraria a utilidade através de números cardinais. No entanto, dado ao caráter subjetivo da ideia de utilidade, este conceito foi

abandonado e passou-se a adotar a ideia de utilidade ordinal. Por esta abordagem, não seria necessário transformar a utilidade numa medida, mas poderíamos utilizá-la para ordenar as preferências do agente (Pindyck & Rubinfeld, 2009; Lesourne, Orléan & Walliser, 2002).

O mecanismo de atribuição de utilidades por parte de um agente decisório pode ser representado por uma função de utilidade. A forma mais popular para determinar uma função de utilidade é extrair as preferências de um agente decisório mediante perguntas relacionadas a loterias (Park & Sharp-Bette, 1990). Qualquer resultado incerto pode ser modelado como se fosse uma “loteria” e isso permitiria saber como um agente racional ordenaria diversos resultados incertos através da maneira como ele ordenaria diferentes loterias (Bierman & Fernandez, 2011).

Quando determinamos a função de utilidade por meio de loterias é comum chamarmos esta função de utilidade de Neuman-Morgenstern, outra possibilidade de determinar esta função seria através da ideia de equivalente certo monetário, nesse caso, a função de utilidade seria de Bernoulli (Siqueira & Santos).

O modelo do agente decisório racional ou a estratégia relacionada a maximização da utilidade tem sido alvo de diversas críticas. Hammerstein (2001, p. 1) critica a ideia do agente decisório racional ter “poder cognitivo e computacional ilimitados para resolver todo problema matemático instantaneamente a um custo zero”. Além disso, seria equivocado imaginar que as preferências humanas seriam invariáveis e passíveis de representá-las por meio de uma função de utilidade. Ao contrário, segundo Hammerstein (2001, p. 2), “pesquisas em psicologia e em economia experimental têm mostrado que (a) as preferências humanas estão longe de serem estáveis e (b) a maioria das decisões são feitas sem o auxílio de uma matemática mais sofisticada”.

Complementando as ideias anteriores, Coleman (2003) afirma que quando uma decisão envolve uma ou mais interações entre os vários agentes, tendo cada agente apenas uma visão parcial dos resultados, um indivíduo acaba não tendo uma base para uma escolha racional sem uma forte suposição da forma como os outros agentes atuarão.

Os indivíduos intencionalmente perseguiriam os seus objetivos, mas isso com base num repertório comportamental limitado pautado em experiências passadas do que por um processo de otimização de longo prazo assumido pela teoria dos jogos clássica; e em muitas situações, emoções como vergonha, desgosto ou inveja podem se combinar para produzir respostas comportamentais (Bowles, 2004).

Ao invés de pensar os indivíduos como simplesmente maximizadores de utilidade, seria mais razoável supor que os comportamentos são decorrentes de regras de bolso, normas sociais, convenções, analogias com situações similares, ou por outro sistema mais complexo que converteria estímulos em ações (Samuelson, 1997). Além disso, razões para as nossas ações também poderia incluir vícios, miopia e outras disfunções bem documentadas do comportamento humano (Bowles, 2004; Moore & Bazerman, 2010). Como resultado, prever o comportamento tomando como base a maximização das recompensas de longo prazo pode ser bastante enganoso (Bowles, 2004).

Assim, segundo Schelling (1980, p. 16-17):

“muitos dos elementos essenciais que entram em um modelo de comportamento racional podem ser identificados com tipos específicos de racionalidade ou irracionalidade. O sistema de valor, o sistema de comunicação, sistema de informação, o processo de decisão coletiva ou um parâmetro que representa a probabilidade ou erro ou perda de controle, podem ser vistos como um *esforço (o grifo é nosso)* para formalizar o estudo da "irracionalidade".”

Portanto, as suposições da racionalidade dos agentes e que as funções de recompensa dos jogadores são de conhecimento comum trazem muitos problemas tanto conceitualmente ou empiricamente (Fudenberg & Levine, 1998).

Em vistas das limitações trazidas pelo modelo do agente racional e procurando a definição de um agente decisório mais realista, a ideia de agente com racionalidade limitada ganhou forma com os trabalhos de Simon (1978, 1979), sendo também utilizada por Williamson (1979, 1981a e 1981b).

Segundo Simon (1957), citado por Williamson (1981b), o termo racionalidade limitada reflete as limitações dos agentes econômicos na formulação e resolução de problemas complexos e no processamento informacional (recebimento, armazenagem, recuperação e transmissão).

A racionalidade limitada se justifica, principalmente, num contexto complexo e dinâmico em que o agente decisório se depara com uma grande dose de incerteza e uma demanda muito grande de atenção (Simon, 1978) aliado à imprecisão, seja pelo poder computacional limitado, seja na obtenção de todas informações necessárias, ou seja, por não possuir funções de utilidade consistentes para comparar alternativas diferentes (Simon, 1979).

Segundo Simon (1979, p. 510), a ideia de racionalidade limitada precisa incorporar: “a necessidade de procurar por decisões alternativas (ao invés da decisão ótima), a substituição da otimização por objetivos e metas satisfatórias e mecanismos de aprendizagem e adaptação.”

Já que o agente econômico seria incapaz de ponderar todas as alternativas (e suas consequências) de decisões possíveis, assim, a racionalidade limitada seria algo intrínseco à natureza humana, ou, segundo Felipe (2008, p. 147), “ela não é alterada e não leva em consideração nem o ambiente onde o agente se encontra e nem seu grau de aprendizado: a capacidade do agente é limitada, em quaisquer circunstâncias.”

Reconhecendo as limitações do modelo do agente racional no estudo de fenômenos econômicos relacionados a organizações, Williamson (1981a, 1981b) utiliza a ideia de racionalidade limitada juntamente com a suposição de oportunismo dos agentes. Williamson chamou esta abordagem do Custo de Transação.

Agentes oportunistas neste contexto, segundo Fiani (2011, p. 90), explorariam as informações privadas de forma maliciosa para obtenção de vantagem. Isso se daria pela “transmissão de informação seletiva, distorcida ou a realização de falsas promessas sobre o comportamento futuro do próprio agente.”

Outros autores, ao invés da ideia de uma racionalidade limitada, utilizam o termo irracionalidade para descrever qualquer desvio da maximização da utilidade (Becker (1962), citado por Simon (1979)) ou definem irracionalidade, segundo Schelling (1980, p.16), como um “sistema de valores inconsistentes e desordenados, cálculos falhos, uma inabilidade de receber mensagens e de se comunicar eficientemente”.

Diferentemente de Simon (1979), que enxerga similaridade entre o conceito de racionalidade limitada e o de irracionalidade de Becker (1962), Williamson (1981a) destaca as diferenças entre a racionalidade limitada, da hiperracionalidade e da irracionalidade. Para isso, ele cria a figura do “homem organizacional” em contraponto com a do “homem econômico” ou “homo economicus”. Segundo ele, a hiperracionalidade é atributo do segundo. Já o “homem organizacional” seria dotado de um aparato cognitivo com menor poder de processamento e de análise. Essa menor capacidade não implicaria em irracionalidade, já que ele se manteria “intencionalmente racional”.

Se o “homem organizacional” é computacionalmente menos competente de que o homem econômico, o mesmo seria motivacionalmente mais complexo (Williamson, 1981a).

Assim, a função de utilidade seria uma forma de embutir racionalidade no agente para modelar o comportamento do “homo economicus”. Já a função de aptidão (*fitness*) darwiniana, seria uma forma mais adequada para o comportamento do *Homo sapiens* e do “homem organizacional” de Williamson (1981a).

Apesar das críticas tecidas contra os pressupostos subjacentes à teoria dos jogos, é importante frisar que a teoria da utilidade é ao mesmo tempo uma abordagem normativa ou axiomática para a tomada da decisão (Park & Sharp-Bette, 1990) e que a teoria dos jogos é um exercício positivo e teórico na investigação de como as decisões são tomadas, ou seja, com base numa noção de racionalidade poder derivar implicações desta noção para os resultados dos jogos (Samuelson, 1997). A teoria dos jogos usando maximização da utilidade é uma busca por regras de comportamento "correto" mediante um comportamento de conflito consciente, inteligente e sofisticado dos jogadores (Schelling, 1980).

Seria então possível ainda fazer uso da teoria dos jogos sem a necessidade da adoção do modelo de agente decisório racional ou do homo economicus? A resposta é sim, e ela se chama teoria dos jogos evolucionária.

Para Fiani (2011, p. 125), a teoria dos jogos evolucionária:

“tem uma consequência muito importante, quando comparada com a abordagem clássica dos jogos, ela (teoria dos jogos evolucionária) não faz muitas exigências com relação à racionalidade dos jogadores. Eles não devem de imediato conhecer a melhor forma de jogar o jogo, como supõe a teoria clássica dos jogos.... Isso torna a teoria dos jogos evolucionária uma ferramenta muito útil, especialmente quando se trata de estudar o comportamento de indivíduos sob a hipótese de racionalidade limitada. Não há a necessidade de se impor exigências severas acerca da forma como os indivíduos tratam as informações além da hipótese de que eles aprendem com seus próprios erros – e com os dos outros.”

Ainda sobre a teoria dos jogos evolucionária, Maynard Smith (1982) enfatiza que ironicamente a teoria dos jogos encontrou mais aplicações dentro da biologia do que dentro da economia. Ainda segundo ele, em aplicações biológicas, a utilidade, conceito artificial e desconfortável, acaba sendo substituído pela aptidão (*fitness*) darwiniana que se torna uma escala natural e genuína deste caso, e mais importante, o conceito de racionalidade humana é substituída pelo de estabilidade evolutiva.

Além da diferença no uso da aptidão darwiniana ao invés da utilidade, Rasmusen (2001) afirma que o conceito de equilíbrio de Nash ou refinamentos dele baseados na informação e sequencialidade, seriam geralmente inapropriados na biologia, em decorrência dos seguintes fatores:

- Capacidade restrita de outros animais, diferentes do *Homo sapiens sapiens*, em pensar sobre estratégias de seus oponentes em cada estágio do jogo. As estratégias desses animais seriam mais prováveis de serem pré-programadas e mais restritas em comparação com a do *Homo sapiens sapiens*;

- Comportamento evolui e qualquer equilíbrio deve considerar a possibilidade de um comportamento diferente causado por uma ocasional mutação;
- Equilíbrio é de conhecimento comum ou que os jogadores não poderiam pré-combinar estratégias.

Com base nos pontos levantados, Rasmusen (2001, p. 125) afirma que “as ideias do equilíbrio de Nash e da racionalidade sequencial são muito menos úteis num contexto biológico do que quando se está modelando jogadores racionais.”

Ormerod e Rosewell (2009) resumem estas diversas abordagens relacionadas a racionalidade do agente do ponto de vista informacional, obtenção e processamento, na tabela abaixo:

<i>Tipo de teoria</i>	<i>Habilidade do agente em obter a informação</i>	<i>Habilidade do agente em processar a informação</i>
Agente Racional	Total	Maximizada
Racionalidade Limitada	Parcial	Maximizada
Teoria dos jogos evolucionária	Parcial	“Regra de bolso”

Tabela 2 – Racionalidade do agente do ponto de vista informacional a partir de diversas teorias (extraído de Ormerod & Rosewell, 2009)

3. TEORIA DOS JOGOS EVOLUCIONÁRIA E ESTRATÉGIA EVOLUTIVAMENTE ESTÁVEL

A origem da teoria dos jogos evolucionária, segundo Maynard Smith (1982), foi denunciada por Fisher (1930), no seu trabalho sobre razão e seleção sexual, seguido por Hamilton (1967) que procurou por uma “estratégia imbatível” para a razão sexual quando havia competição local por parceiro(a)s. O conceito de “estratégia imbatível” é essencialmente a mesma de Estratégia Evolutivamente Estável (EEE) introduzida por Maynard Smith e Price (1973) no seu importante trabalho sobre conflito animal. Historicamente, a teoria dos jogos evolucionária foi inaugurada por esses dois autores (Hammerstein, 2001).

Para um entendimento inicial dos objetivos e da metodologia utilizada por esta teoria, considere agentes que pertencem a uma população bem grande e que jogarão um jogo de diversas rodadas. A cada rodada um par de agentes é aleatoriamente formado com os elementos dessa população. Cada jogador é biologicamente ou socialmente condicionado a ter uma estratégia pré-programada.

Ao longo das rodadas, as estratégias mais adaptadas ao ambiente tenderão a aumentar a sua frequência relativa na população. Num estado de equilíbrio, as estratégias menos adaptadas tenderão a desaparecer.

Esta forma de raciocinar é a base da teoria dos jogos evolucionária que é voltada para permitir a análise de uma seleção evolucionária em ambientes interativos (Weibull, 1997).

Diferente da teoria dos jogos, na qual o objetivo é explicar como os agentes deveriam racionalmente se comportar em determinadas situações, a teoria dos jogos evolucionária procura explicar como um comportamento evolui ou persiste ao longo do tempo mediante influências ou choques exógenos (Rasmusen, 2001), i.e., estuda-se a convergência de um processo adaptativo.

Assim, a teoria dos jogos evolucionária, ao utilizar uma modelagem evolutiva poderia ajudar a restringir o leque de hipóteses de comportamento plausíveis por distinguir entre as emoções, as capacidades cognitivas e outras influências sobre comportamentos cujo surgimento e difusão podem plausivelmente ser considerados ao longo dos períodos relevantes da história da humanidade e aqueles que não podem (Bowles, 2004).

Desde que racionalidade pode não nos informar sobre a melhor estratégia possível num novo cenário, agentes racionais tenderão por impulso a imitar os comportamentos mais bem-

sucedidos. Dessa forma, esse mecanismo de seleção seria mais válido no caso de humanos do que dentre as populações de insetos ou animais (Hargreaves-Heap & Varoufakis, 2004).

Na teoria dos jogos evolucionária, consideramos que os jogadores são idênticos (condição *ceteris paribus*, o resultado da interação depende exclusivamente da estratégia adotada por cada jogador) (Rasmusen, 2001). Além disso, eles provem de uma população grande e, por fim, a cada rodada, pares de jogadores serão formados aleatoriamente desta população para jogarem um determinado jogo, sendo que cada jogador terá um conjunto finito de estratégias que poderá usar contra o outro. Neste caso, uma estratégia será equivalente a um fenótipo comportamental, e.g.: o tamanho da prole e idade reprodutiva (Maynard Smith, 1982).

O ponto de partida para um modelo evolutivo, como comentado anteriormente, é que os indivíduos possuem uma racionalidade limitada. Neste caso, as estratégias emergiriam de um processo de erros e acertos na qual os jogadores encontram estratégias que tem um desempenho melhor que as outras. Estratégias que trazem uma recompensa maior tenderiam a desencorajar as que trazem uma recompensa menor.

Embora esta teoria não pressuponha a racionalidade dos agentes, o processo seletivo poderia direcionar os agentes a optarem por um comportamento “racional” de equilíbrio (Samuelson, 1997) ou, em outras palavras, para um observador será como se o equilíbrio tivesse sido obtido mediante as decisões racionais dos jogadores, e essa característica de quase racionalidade geralmente encontramos nos modelos de adaptação darwinianos (Hammerstein, 2001).

Gintis (2009) mostra através de simulações computacionais baseadas em agente, pautadas em modelos evolutivos, que jogos envolvendo indivíduos estúpidos podem evoluir para a solução de jogos previamente imaginados para exigir “racionalidade” e alto nível de capacidade de processamento de informações.

Assim, ao modelarmos um problema usando da teoria dos jogos evolucionária ao invés da teoria dos jogos clássica, estamos trocando o modelo do ator racional pelas forças da Evolução. Além disso, pressupomos que após diversas rodadas, o estado final do sistema acabará refletindo uma quase racionalidade, i.e., o sistema será conduzido para um Equilíbrio de Nash (Hammerstein, 2001). É fácil mostrar que um Equilíbrio Evolutivo Estável necessariamente será um Equilíbrio de Nash (Hammerstein & Selten, 1994), citado por Hammerstein (2001).

Além do problema do agente racional, a teoria dos jogos evolucionária ajuda a explicar a origem de uma solução em problemas nos quais não existe um único equilíbrio aparente (Hargreaves-Heap & Varoufakis, 2004).

Outra diferença marcante é que, ao invés da maximização da utilidade, na teoria dos jogos evolucionária, a maximização será pela aptidão darwiniana (Demetrius & Gundlach, 2000) que se encontra relacionado a ideia de reprodução e sobrevivência (Darwin, 1996). Lembre-se que na teoria dos jogos evolucionária o que importará no estado de equilíbrio será a frequência fenotípica de cada estratégia analisada.

Devido ao seu papel crucial no darwinismo e, conseqüentemente, na teoria dos jogos evolucionária, cabe discutirmos um pouco mais o conceito de aptidão darwiniana.

Apesar da ideia de aptidão darwiniana, ou simplesmente aptidão, parecer simples, a sua definição ainda é motivo de bastante disputa entre biólogos e filósofos da ciência (Mills & Beatty, 2006). E.g., Waddington (1968, p. 19), citado por Mills e Beatty (2006, p. 4), sugere que os indivíduos com mais aptidão serão aqueles que “mais efetivamente deixarão gametas na próxima geração”. Grant (1977, p. 66) define aptidão como uma “medida de sucesso reprodutivo”. Conforme Roff (2010), aptidão darwiniana na sua ideia mais ampla estaria relacionada à taxa de aumento dos genótipos numa população.

O problema com muitas definições existentes sobre aptidão é que algumas delas nada mais são do que descrever novamente o fenômeno a ser explicado, i.e., recai-se numa circularidade. Por exemplo, ao definirmos aptidão em termos de sucesso reprodutivo e de sobrevivência para dizer que um organismo A tem mais aptidão do que um tipo B basta dizer que o tipo A deixará um número maior de descendentes do que o tipo B. Claramente, não podemos dizer que a diferença entre as aptidões entre esses dois tipos explicaria a diferença entre a contribuição média dos descendentes de A e de B quando definimos a aptidão como sucesso reprodutivo (Mills & Beatty, 2006).

William (1970, p. 358), ao invés de definir explicitamente aptidão, prefere dar uma definição implícita deste termo mediante uma abordagem axiomática da teoria de Darwin. Para essa autora, aptidão é:

“uma medida da qualidade de relacionamento entre um organismo e o seu ambiente, sendo que ambiente é o conjunto de todos os fatores externos que tem influência sobre a sua vida. Este relacionamento é determinado por fatores como fertilidade, habilidade em obter comida, habilidade em evitar perigos etc. Aptidão é algo hereditário; i.e., existe uma correlação entre quanto aptidão um organismo possui no seu ambiente e quanto aptidão a sua prole tem em seus ambientes. E, finalmente, nenhum organismo tem uma aptidão igual a zero.”

Dentre as definições e conceituações dadas à aptidão, optamos por nos apoiar em duas, que são complementares. A primeira, de Mills e Beatty (2006, p.9), que define aptidão de um organismo como sendo “sua propensão ou habilidade em sobreviver e reproduzir numa população e ambiente particularmente especificados”. A segunda, mais apropriada num contexto relativo a teoria dos jogos evolucionária, conforme Demetrius e Ziehe (2007), é “a capacidade de um tipo de variante deslocar o genótipo residente numa competição por recursos disponíveis.”

Nos modelos desenvolvidos neste trabalho para estudar o comportamento cooperativo, semelhantemente a Roff (2010, p.60), o nosso interesse será por “um traço em particular e, para simplificar a análise, assume-se que a maximização de algum componente da história de vida é equivalente a maximização da aptidão”. E.g., nós poderemos querer determinar a melhor estratégia a ser utilizada num dilema do prisioneiro. Então, a nossa suposição é que esta estratégia, ao maximizar o benefício ou a recompensa para o prisioneiro pela redução da sua pena, será equivalente a maximizar a sua aptidão darwiniana.

Com a teoria dos jogos evolucionária queremos entender porque o Processo de Seleção Natural favoreceu alguns traços e não outros. O nosso objetivo sempre será determinar a situação de Equilíbrio Evolutivo Estável e quais seriam as estratégias/fenótipos presentes neste estado.

O conceito de Estratégia Evolutiva Estável (EEE) ou de não invasibilidade é crucial na teoria dos jogos evolucionária. Segundo Maynard Smith (1982, p. 10):

“Uma EEE é uma estratégia tal que, se todos os membros da população a adotassem, então nenhuma estratégia mutante poderia invadir esta população sob a influência da seleção natural. O conceito é expresso em termos de uma “estratégia” por ter se originado num contexto de comportamento animal.”

Com o intuito de explicar melhor os principais conceitos relacionados a teoria dos jogos evolucionária e fornecer uma base para entender uma conceituação mais rigorosa sobre os mesmos, vamos lançar mão do jogo clássico do conflito entre o Falcão e a Pomba.

3.1 Exemplo de um jogo evolutivo: Falcão-Pomba

Considere uma população grande de organismos idênticos. A cada rodada um par de organismos denominados jogadores será escolhido aleatoriamente desta população. Note que estes jogadores serão idênticos, com exceção apenas da estratégia escolhida a ser jogada contra

o seu oponente. O conjunto de estratégias se restringe apenas a duas: a estratégia Falcão (F) e a estratégia Pomba (P).

A estratégia Pomba consiste inicialmente em ameaçar o oponente e, caso ele responda ameaçando, ambos os jogadores acabarão dividindo o recurso em disputa. Se por outro lado, o outro jogador responder a ameaça com agressão, o jogador que adota a estratégia P irá partir em retirada sem sofrer nenhum dano físico e deixando todo o recurso para o agressor.

Na estratégia F, o jogador já opta no começo pelo confronto. Assim, quando dois jogadores que adotam a estratégia F se encontram, haverá sempre uma luta pelo recurso. Vamos considerar que um dado jogador que adote esta estratégia contra ela mesma, na metade das vezes será o vencedor e na outra metade o perdedor.

Vamos definir os ganhos e as perdas resultantes da interação dessas estratégias em termos de aptidão darwiniana, ou simplesmente aptidão, dos jogadores que as adotam. Para isso vamos definir $V(E_1 | E_2)$ como sendo a função de recompensa (*payoff*) obtida pela estratégia focal E_1 ao interagir com a estratégia E_2 .

Vale a pena salientar neste ponto que a forma de representar a função de recompensa $V(E_1 | E_2)$ é parecida com $\pi(s_i, s_{-i})$, onde a primeira forma foi consagrada em Maynard Smith (1982), e a segunda é adotada pela maioria dos livros e trabalhos na economia.

Voltando ao jogo Falcão-Pomba, suponha que o valor do recurso seja v (medido em unidade de *fitness*) e que o custo de perder uma luta seja c (medido em unidade de *fitness*), vamos admitir, que v e c satisfaçam a seguinte desigualdade: $v > c > 0$.

Assim, a função de recompensa de um jogador que adote a estratégia P, respectivamente, interagindo com outro que adote a mesma estratégia e que adote a estratégia F, será:

$$V(P | P) = \frac{v}{2} \quad (5) \quad \text{e} \quad V(P | F) = 0 \quad (6)$$

Fazendo o mesmo para o jogador que adote a estratégia F, teremos:

$$V(F | F) = \frac{v}{2} + \frac{-c}{2} = \frac{v-c}{2} \quad (7) \quad \text{e} \quad V(F | P) = v \quad (8)$$

Uma forma conveniente de apresentar todas estas informações relacionadas as recompensas decorrente dessas interações seria por meio de uma matriz de recompensas. No caso do jogo Falcão-Pomba, teremos:

		Jogador Coluna	
		Falcão	Pomba
Jogador Linha	Falcão	$\frac{v-c}{2}; \frac{v-c}{2}$	$v; 0$
	Pomba	$0; v$	$\frac{v}{2}; \frac{v}{2}$

Tabela 3 - Matriz de recompensas no jogo Falcão-Pomba (elaborado pelo próprio autor)

As recompensas apresentadas nas caselas referem, respectivamente, ao jogador-linha, e ao jogador-coluna.

Baseado no jogo Falcão-Pomba introduziremos o conceito de Estratégia Evolutivamente Estável (EEE).

Considere uma população muito grande de jogadores que adotam a estratégia comum I . Admita que uma proporção infinitesimal (ε) de jogadores que adotam a estratégia J invada esta população.

As funções de aptidão (*fitness*) média para este caso são:

$$W(I) = W_0 + (1 - \varepsilon)V(I|I) + \varepsilon V(I|J) \quad (9)$$

$$W(J) = W_0 + (1 - \varepsilon)V(J|I) + \varepsilon V(J|J) \quad (10)$$

A seleção irá se opor a invasão de J em I se a aptidão média de I for maior do que a aptidão média de J :

$$W(I) > W(J) \quad (11)$$

$$(1 - \varepsilon)V(I|I) + \varepsilon V(I|J) > (1 - \varepsilon)V(J|I) + \varepsilon V(J|J)$$

Segundo Maynard Smith e Price (1973) duas condições devem ser consideradas aqui:

Ou Condição A: quando $V(I|I) \neq V(J|I)$. Como $W(I) > W(J)$ e $\varepsilon \cong 0$, então quando cancelamos o termo ε da inequação 11, obtemos que a condição A equivale a dizer se $V(I|I) \neq V(J|I)$ então $V(I|I) > V(J|I)$.

Ou Condição B: quando $V(I|I) = V(J|I)$. Neste caso, simplificando a inequação 11, conclui-se que a estratégia comum I ainda poderia ser um EEE, se $V(I|J) > V(J|J)$. Logo, a condição B equivale a dizer se $V(I|I) = V(J|I)$ então $V(I|J) > V(J|J)$.

As condições apresentadas acima para que uma estratégia seja uma EEE é uma combinação de um requisito para que esta estratégia seja um equilíbrio de Nash (condição A) e outro relacionado a estabilidade (condição B) (Samuelson, 1997; Weibull, 1997).

Apesar das condições A e B se referirem a comparação de aptidões médias, poderíamos obter as mesmas conclusões pela comparação das recompensas médias das estratégias envolvidas, já que estratégias que obtivessem as maiores recompensas, em decorrência das diversas interações, também possuiriam as maiores aptidões médias, ou seja, maiores recompensas refletiriam nas maiores aptidões médias. Esse tipo de tratamento pode ser encontrado em McElreath e Boyd (2007).

Portanto, uma estratégia *I* que satisfaça qualquer uma das condições anteriores (A ou B) será considerada uma Estratégia Evolutivamente Estável (EEE) sobre uma estratégia *J*. Esta estratégia *I* pode ser uma estratégia pura ou mista, sendo que esta última, consiste em adotar uma combinação específica de estratégias das quais não haveria uma que seria mais apta que as demais (Maynard Smith, 1982).

Interpretando as condições A e B do ponto de vista de um equilíbrio de Nash, temos na primeira condição um equilíbrio forte de Nash, i.e., a estratégia *I* será uma estratégia dominante e uma estratégia forte de Nash, enquanto que na condição B teremos apenas um equilíbrio fraco de Nash, sendo a estratégia *I* uma estratégia fraca de Nash (Rasmusen, 2001).

Assim, o conceito de EEE seria um refinamento de um equilíbrio de Nash (Rasmusen, 2001; Hammerstein, 2001), pois a EEE não apenas teria que ser a melhor resposta, mas (a) teria que resultar na maior recompensa dentre todas as estratégias no equilíbrio e que (b) deveria ser estritamente a melhor resposta em relação a si mesma (Rasmusen, 2001).

Portanto, utilizando se de uma representação na forma de conjuntos, teríamos a estratégia evolutivamente estável (EEE) como sendo um subconjunto do conjunto de equilíbrio de Nash. Assim, toda EEE seria um equilíbrio de Nash, mas nem todo equilíbrio de Nash seria uma EEE.

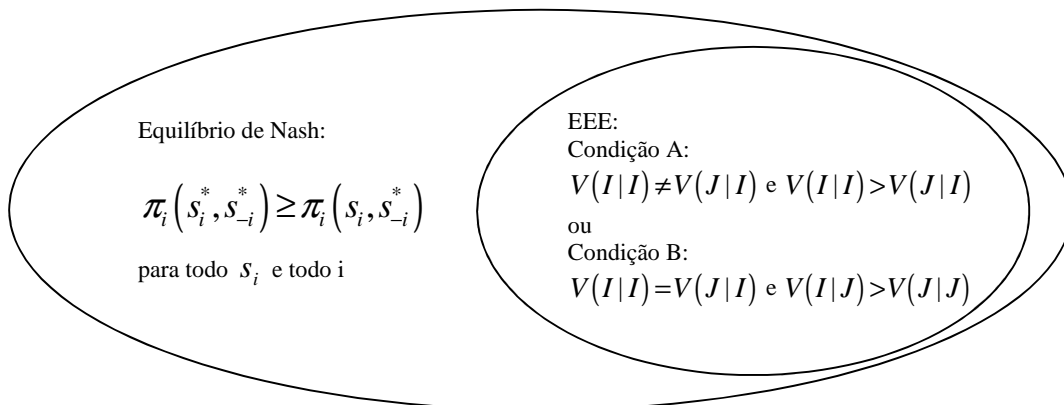


Figura 2 - Diagrama de Venn relacionando equilíbrio de Nash e EEE (elaborado pelo próprio autor)

Quando o jogo evolucionário envolve três estratégias, é comum representarmos os possíveis equilíbrios puros e polimórficos, i.e., equilíbrios nos quais coexistirão mais do que uma estratégia pura, por meio de um diagrama ternário.

Na figura abaixo, temos exemplos de diagramas ternários referentes a um jogo Falcão-Pomba-Retaliador. O diagrama ternário é basicamente um triângulo equilátero, tendo nos seus vértices, a representação de cada estratégia pura. Os pontos internos ao triângulo representam uma mistura das três estratégias apresentadas.

A frequência de cada estratégia é dada pelo comprimento do segmento de reta perpendicular à face oposta ao vértice da estratégia, que se estende a partir da face oposta ao ponto (Figura 3).

Pontos hachurados ao longo dos lados do triângulo representam equilíbrios evolutivos estáveis (ponto hachurado p), enquanto pontos não hachurados representam equilíbrios evolutivos neutros (ponto não hachurado q). Além disso, nas flechas podemos observar as trajetórias evolutivas a partir de diferentes misturas das estratégias existentes (Figura 3).

Podemos também notar que os pontos de equilíbrio tendem a funcionar como pontos de atração. Observe que se a população começar com qualquer proporção entre as estratégias que se traduza num ponto interior do triângulo bem próximo ao ponto hachurado p, terá como equilíbrio evolutivo final uma proporção entre falcões e pombas (ponto hachurado p).

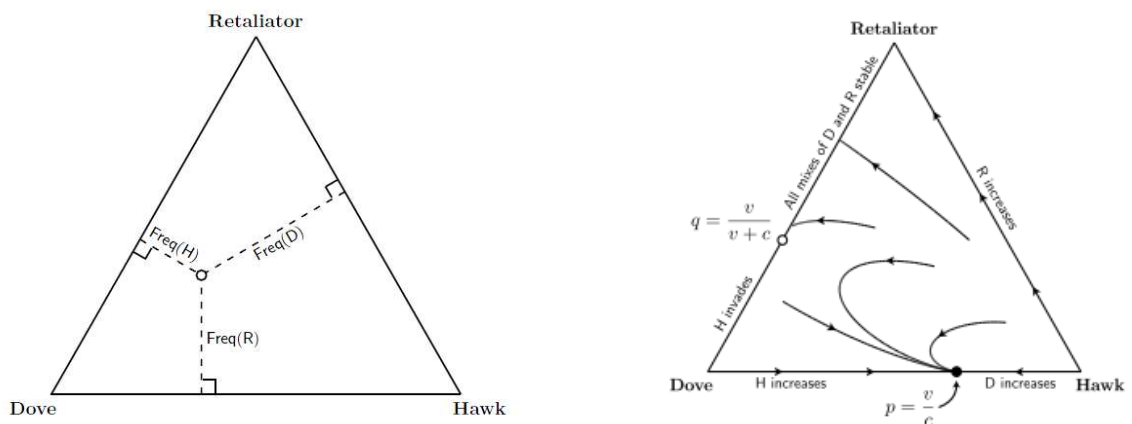


Figura 3 - Elementos de um diagrama ternário e exemplo de um diagrama ternário para o jogo evolucionário Falcão-Pomba-Retaliador (McElreath & Boyd (2007, p. 51))

4. DILEMAS SOCIAIS DE DOIS JOGADORES

Considere o jogo abaixo envolvendo as estratégias cooperar (C) e não cooperar (D) e a seguinte matriz de recompensas do jogador Linha ao interagir com o jogador Coluna.

		Jogador Coluna	
		Cooperar (C)	Não Cooperar (D)
Jogador Linha	Cooperar (C)	<i>Reward</i>	<i>Sucker</i>
	Não cooperar (D)	<i>Temptation</i>	<i>Punishment</i>

Quadro 1 - Matriz de recompensas de um jogo cooperativo para dois jogadores (elaborado pelo próprio autor)

O jogo descrito acima poderia ser classificado como um dilema cooperativo (Hauert et al., 2006; Nowak, 2012; Rand & Nowak, 2013) se a cooperação mútua gerasse ganhos maiores do que a mútua não cooperação ($R > P$) e, além disso, houvesse algum incentivo para a não cooperação. Este incentivo poderia ser apresentado de três formas diferentes, a saber:

- I) $T > R$: isso significa que ao jogar contra um cooperador sempre será melhor trair;
- II) $P > S$: isso significa que ao jogar contra um não cooperador sempre será melhor trair;
- III) $T > S$: isso significa que ser um não cooperador será sempre melhor do que ser um cooperador ou, dito de outra forma, num encontro entre uma estratégia cooperativa e outra que trai, sempre será melhor ser o não cooperador.

Portanto, se $R > P$ e, além disso, pelo menos uma das três condições existir (I, II ou III), o jogo será chamado de dilema cooperativo. Caso contrário, não haverá nenhum tipo de dilema e cooperar será sempre melhor do que não cooperar.

Por fim, é importante mencionar que quando $R > P$ e as três condições coexistirem num mesmo jogo, teremos então o conhecido dilema do prisioneiro.

Para analisarmos mais detalhadamente os dilemas sociais de dois jogadores mais populares.

Vamos começar considerando duas possíveis estratégias, a saber: cooperar (C) e não cooperar (D). O benefício advindo da cooperação, para ambos, se apenas um cooperar será de $c.r_1$, e de $c.r_2$ se ambos cooperarem, sendo que $r_1 > 0$ e $r_2 > 1$. Já o custo incorrido por cada jogador ao cooperar será de $c > 0$.

Além disso, não haveria nem ganhos e nem perdas para uma mútua não cooperação, suposição do modelo. Para facilitar o entendimento, mantivemos a representação $V(E_1 | E_2)$, significando a recompensa da estratégia E_1 quando ela interage com a estratégia E_2 .

Assim, as recompensas possíveis decorrentes das interações das duas estratégias seriam:

$$V(C | C) = cr_2 - c \quad (12)$$

$$V(C | D) = cr_1 - c \quad (13)$$

$$V(D | C) = cr_1 \quad (14)$$

$$V(D | D) = 0 \quad (15)$$

Outra forma de representar as recompensas obtidas pelos dois jogadores neste jogo seria por meio de uma matriz de recompensas. A mesma pode ser observada abaixo, sendo que o primeiro valor refere-se ao jogador linha e o segundo, ao jogador coluna.

		Coluna	
		Cooperar (C)	Não Cooperar (D)
Linha	Cooperar (C)	$c.r_2 - c; c.r_2 - c$	$c.r_1 - c; c.r_1$
	Não Cooperar (D)	$c.r_1; c.r_1 - c$	0;0

Quadro 2 - Matriz de recompensas parametrizadas de um jogo cooperativo para dois jogadores (elaborado pelo próprio autor)

Ao delinear o jogo desta forma, poderíamos ter quatro resultados ou equilíbrios diferentes em função dos parâmetros r_1 e r_2 escolhidos, conforme o quadro abaixo:

<i>Tipo de Jogo</i>	<i>Condições</i>
Sem conflito ou cooperação total	$r_2 - r_1 > 1$ e $r_1 > 1$
Dilema da caça ao cervo ou jogo da coordenação	$r_2 - r_1 > 1$ e $r_1 < 1$
Dilema do “Galinha” ou do “Medroso”	$r_2 - r_1 < 1$ e $r_1 > 1$
Dilema do Prisioneiro	$r_2 - r_1 < 1$ e $r_1 < 1$

Quadro 3 – Condições definidoras de cada dilema cooperativo para dois jogadores (elaborado pelo próprio autor)

A seguir iremos delinear melhor cada um dos jogos mencionados, esclarecendo melhor as condições subjacentes e discutindo o(s) ponto(s) de equilíbrio, caso exista(m).

1º Possibilidade: Sem conflito ou cooperação total ($r_2 - r_1 > 1$ e $r_1 > 1$)

Para determinar qual será o equilíbrio, vamos comparar as recompensas de cada estratégia, condicionada com a estratégia com a qual ela interage.

Para a condição sem conflito, observa-se que as recompensas de cada estratégia podem ser ordenadas da seguinte forma:

$$\begin{array}{ll}
 V(C|C) > V(D|C) & V(C|D) > V(D|D) \\
 cr_2 - c > cr_1 & cr_1 - c > 0 \\
 c(r_2 - 1) > cr_1 & c(r_1 - 1) > 0 \\
 r_2 - 1 > r_1 & r_1 - 1 > 0 \\
 r_2 - r_1 > 1 & r_1 > 1
 \end{array}
 \quad (16) \quad e \quad (17)$$

Portanto, independentemente da estratégia escolhida pelo outro jogador, sempre valerá a pena cooperar. Na teoria dos jogos dizemos que a estratégia cooperar será uma estratégia estritamente dominante sobre a de não cooperar. Logo, o único equilíbrio deste jogo seria ambos os jogadores cooperarem, que, por sinal, será também o equilíbrio de Nash.

Lembrando que este tipo de equilíbrio ocorre quando cada jogador utiliza a sua melhor estratégia frente a melhor estratégia do seu respectivo oponente, no caso deste dilema, será sempre cooperar com o oponente.

No momento em que os dois jogadores estiverem no equilíbrio de Nash, nenhum deles terá nenhum incentivo em se comportar de uma forma diferente, pois se fizer isso, obterá uma recompensa inferior ao do equilíbrio de Nash.

Representando graficamente este dilema, temos:

		Coluna	
		Cooperar (C)	Não Cooperar (D)
Linha	Cooperar (C)	(C;C) ← (C;D)	(C;D)
	Não Cooperar (D)	(D;C) ← (D;D)	(D;D)

Quadro 4 - Matriz de recompensas e análise de equilíbrio do dilema de cooperação total de dois jogadores (elaborado pelo próprio autor)

No quadro anterior, as flechas horizontais e verticais se referem, respectivamente, às preferências dos jogadores coluna e linha em virtude das recompensas envolvidas no jogo. Por exemplo, fixando o comportamento do jogador linha em cooperar (C), o jogador coluna sempre irá preferir também cooperar (C) em virtude da maior recompensa recebida. Esta análise pode ser resumida pela direção da reta horizontal na primeira linha.

Análise semelhante pode ser feita para todas as outras três flechas apresentadas no quadro acima.

Ainda no quadro anterior, podemos observar que o equilíbrio de Nash se estabelece no ponto de convergência das flechas desenhadas, i.e., ao seguir qualquer uma das quatro flechas, verifica-se que todas elas convergem para a condição de cooperação mútua entre os jogadores linha e coluna. Condição esta que se encontra negritada no quadro 4.

2º Possibilidade: Dilema da caça ao cervo ou jogo da coordenação ($r_2 - r_1 > 1$ e $r_1 < 1$)

Novamente, para determinar qual será o equilíbrio, vamos comparar as recompensas de cada estratégia, condicionada com a estratégia com a qual ela interage. Fazendo esta comparação aos pares, temos:

$$\begin{array}{l}
 V(C|C) > V(D|C) \\
 cr_2 - c > cr_1 \\
 c(r_2 - 1) > cr_1 \quad (18)
 \end{array}
 \quad e \quad
 \begin{array}{l}
 V(C|D) < V(D|D) \\
 cr_1 - c < 0 \\
 c(r_1 - 1) < 0 \quad (19) \\
 r_1 - 1 < 0 \\
 r_1 < 1
 \end{array}$$

Portanto, as recompensas podem ser ordenadas da seguinte forma:

$$V(C|C) > V(D|C) > V(D|D) > V(C|D). \quad (20)$$

Em outras palavras, dado que um dos jogadores coopere, sempre será melhor para o outro jogador cooperar; se um dos jogadores não cooperar, sempre será melhor para o outro não cooperar também. Portanto, neste caso, teremos dois equilíbrios de Nash, sendo eles (cooperar; cooperar) e (não cooperar; não cooperar).

Representando de outra forma, temos:

		Coluna	
		Cooperar (C)	Não Cooperar (D)
Linha	Cooperar (C)	(C;C) ← (C;D)	(C;D) ↓
	Não Cooperar (D)	(D;C) ↑	(D;D) ← (D;C)

Quadro 5- Matriz de recompensas e análise de equilíbrio do jogo da coordenação de dois jogadores (elaborado pelo autor)

3º Possibilidade: Dilema do “Galinha” ou do “Medroso” ($r_2 - r_1 < 1$ e $r_1 > 1$)

Novamente, para determinar qual será o equilíbrio, vamos comparar as recompensas de cada estratégia, condicionada com a estratégia com a qual ela interage. Como feito anteriormente, vamos fazer esta comparação novamente aos pares. Logo:

$$\begin{array}{ll}
 V(C|C) < V(D|C) & V(C|D) > V(D|D) \\
 cr_2 - c < cr_1 & cr_1 - c > 0 \\
 c(r_2 - 1) < cr_1 & c(r_1 - 1) > 0 \quad (22) \\
 r_2 - 1 < r_1 & r_1 - 1 > 0 \\
 r_2 - r_1 < 1 & r_1 > 1
 \end{array}
 \quad (21) \quad e$$

Portanto, as recompensas podem ser ordenadas da seguinte forma:

$$V(D|C) > V(C|C) > V(C|D) > V(D|D). \quad (23)$$

Em outras palavras, dado que um dos jogadores coopere, sempre será melhor para o outro jogador não cooperar; se um dos jogadores não cooperar, sempre será melhor para o outro cooperar. Portanto, neste caso, teremos dois equilíbrios de Nash, sendo eles (cooperar; não cooperar) e (não cooperar; cooperar).

Representando de outra forma, temos:

		Coluna	
		Cooperar (C)	Não Cooperar (D)
Linha	Cooperar (C)	(C;C) → (C;D)	
	Não Cooperar (D)	(D;C) ← (D;D)	

Quadro 6- Matriz de recompensas e análise de equilíbrio do dilema do "medroso" de dois jogadores (elaborado pelo autor)

Para entender melhor o contexto no qual este dilema se encaixa, vide Fiani (2008, p. 112).

4º Possibilidade: Dilema do Prisioneiro ($r_2 - r_1 < 1$ e $r_1 < 1$)

Novamente, para determinar qual será o equilíbrio, vamos comparar as recompensas de cada estratégia, condicionada com a estratégia com a qual ela interage. Mas, desta vez, vamos fazer esta comparação aos pares. Logo:

$$\begin{array}{l}
 V(C|C) < V(D|C) \\
 cr_2 - c < cr_1 \\
 c(r_2 - 1) < cr_1 \quad (24) \\
 r_2 - 1 < r_1 \\
 r_2 - r_1 < 1
 \end{array}
 \quad e \quad
 \begin{array}{l}
 V(C|D) < V(D|D) \\
 cr_1 - c < 0 \\
 c(r_1 - 1) < 0 \quad (25) \\
 r_1 - 1 < 0 \\
 r_1 < 0
 \end{array}$$

Portanto, as recompensas podem ser ordenadas da seguinte forma:

$$V(D|C) > V(C|C) > V(D|D) > V(C|D). \quad (26)$$

Em outras palavras, dado que um dos jogadores coopere, sempre será melhor para o outro jogador não cooperar; se um dos jogadores não cooperar, sempre será melhor para o outro não cooperar também. Portanto, neste caso, não cooperar será uma estratégia estritamente dominante sobre cooperar. Logo, o equilíbrio de Nash deste jogo seria ambos jogadores não cooperarem. Representando de outra forma, temos:

		Coluna	
		Cooperar (C)	Não Cooperar (D)
Linha	Cooperar (C)	(C;C) $\xrightarrow{\hspace{1cm}}$ (C;D)	(C;D)
	Não Cooperar (D)	(D;C) $\xrightarrow{\hspace{1cm}}$ (D;D)	(D;D)

Quadro 7 - Matriz de recompensas e análise de equilíbrio do dilema do prisioneiro de dois jogadores (elaborado pelo próprio autor)

Apresentamos um exemplo numérico no capítulo 6.1.

O dilema do prisioneiro é o dilema cooperativo mais rigoroso, pois neste jogo os não cooperadores têm domínio sobre os cooperadores e em populações bem “misturadas” a seleção natural sempre irá favorecer a não cooperação Rand e Nowak (2013).

Em vista disso, para que a cooperação possa evoluir num dilema do prisioneiro de dois ou mais jogadores, mecanismos adicionais seriam necessários.

Henrich e Henrich (2007), com ênfase numa visão antropológica, mencionam cinco mecanismos para a evolução da cooperação numa díade, sendo eles: parentesco, reciprocidade direta, reciprocidade indireta baseada na reputação, normas sociais e etnicidade.

Os cinco mecanismos citados por Nowak (2012), Nowak (2006b) para promover/fomentar o comportamento cooperativo, e assim, possibilitar a sua propagação são: a seleção por parentesco, reciprocidade direta e indireta, a seleção multinível e a seleção espacial. Na figura abaixo, estão representados os mecanismos mencionados anteriormente e a maneira como cada um atuaria para favorecer a cooperação.

Direct reciprocity



Indirect reciprocity



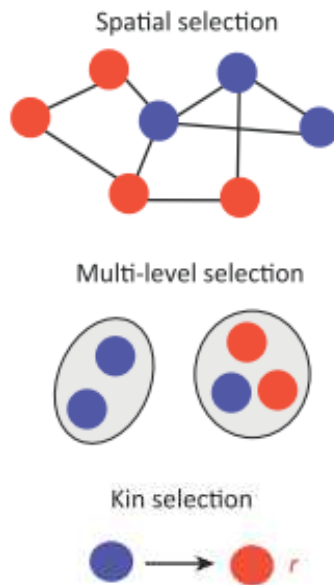


Figura 4- Os cinco mecanismos necessários para promover o comportamento cooperativo (Rand & Nowak, 2013, p. 414)

Uma análise mais detalhada de cada mecanismo será fornecida nos capítulos seguintes. Mas, a ideia básica subjacente a cada mecanismo e retratada na figura acima é que na reciprocidade direta a cooperação seria favorecida por uma interação iterada entre dois indivíduos. A reciprocidade indireta se baseia na reputação, ou seja, apenas cooperarei com alguém que tenha cooperado com outros no passado. A representação da seleção espacial traz a ideia de que a cooperação poderia ser favorecida se os cooperadores pudessem estar reunidos num *cluster*, ao invés de estarem dispersos em meio de não cooperadores. Já na seleção multinível, haveria uma seleção em nível de grupo e indivíduo. Por fim, na seleção de parentesco, a cooperação seria direcionada para indivíduos com certo grau de parentesco r .

5. MECANISMOS PARA A EVOLUÇÃO DA COOPERAÇÃO

5.1 Seleção por Parentesco

Eu daria a minha vida por dois irmãos ou oito primos.
J.B.S. Haldane

Numa colônia de abelhas encontramos operárias, zangões e a rainha. As operárias são uma casta não reprodutiva ou estéril. Dentre algumas funções das operárias estão a alimentação das larvas, cuidado da prole, defesa da colmeia de invasores, dando, se for preciso, a própria vida para isso.

De acordo com Dugatkin (2006), Darwin reconheceu que a seleção natural não apenas atuaria sobre a morfologia, mas também sobre o comportamento. Assim, como os traços

comportamentais são passados de pais para filhos e esses teriam uma forte correlação sobre a aptidão da prole. Logo, podemos esperar que a seleção favoreça a propagação desses traços em detrimento dos outros.

Como poderia então o tipo de comportamento observado nas operárias ser selecionado? Darwin via claramente a dificuldade de utilizar a seleção natural para explicar isso e este enigma desafiou várias mentes brilhantes nas últimas décadas.

A resposta deste quebra-cabeça foi proposta inicialmente por J. B. S. Haldane a mais de meio século atrás e formalizado matematicamente por William Donald Hamilton em 1964, no artigo publicado no *Journal of Theoretical Biology* (Hamilton, 1964).

De acordo com a regra de Hamilton haverá a propagação da cooperação se:

$$rb > c \quad (27)$$

A desigualdade acima afirma que o organismo focal colaborará com outro, se o coeficiente de parentesco ponderado pelo benefício que o outro receberá for maior do que o custo incorrido pelo organismo focal no ato de cooperar (Nowak, 2011; McElreath & Boyd, 2007).

Parentesco, aqui, é definido como a chance de compartilharem um gene acima do acaso (Nowak, 2006b).

De acordo com Henrich e Henrich (2007), indivíduos aparentados teriam muitas características em comum, inclusive todo(s) gene(s) importante(s) para favorecer a cooperação, e a seleção natural poderia tirar proveito disso direcionando a ajuda ou cooperação para outros indivíduos que provavelmente tivessem os genes da cooperação. Ainda de acordo com esses autores, por exemplo, um parente, como um irmão, poderia ter odor ou aparência similar. Esse mecanismo psicológico de identificação pode ter sido selecionado pela seleção natural para direcionar a ajuda para indivíduos que parecem ou tenham o mesmo odor que o meu. Outro aspecto que poderia promover a seleção por parentesco seria o fato da dispersão limitada da prole da sua terra natal (McElreath & Boyd, 2007).

É importante frisar dois aspectos daquilo que foi apresentado: primeiramente, é que a regra de Hamilton sempre envolve uma díade, i.e., interação de um par de organismos, i.e., quem ajuda e quem recebe a ajuda; em segundo lugar, se refere à maneira escolhida para apresentar a regra de Hamilton, que no nosso caso não equivale a deduzi-la, vide apêndice B.

A dedução da regra de Hamilton pode ser encontrada, por exemplo, em McElreath e Boyd (2007) ou Frank (1998).

Várias críticas têm sido feitas à validade da regra de Hamilton.

Talvez a mais contundente veio com a publicação do artigo *The evolution of eusociality* de Nowak, Tarnita e Wilson (2010). Basicamente nele é mostrado que a seleção de parentesco seria uma situação muito peculiar da seleção natural, sendo que determinadas condições deveriam existir, dentre elas: todas as relações deveriam ser em pares e aditivas, algo que não ocorre, por exemplo, numa colônia de formigas, e, além disso, a seleção por parentesco estaria restrita a estruturas populacionais simples. Apesar destas críticas, Nowak e Highfield (2011, p. 133) afirmam que “apesar das limitações da regra de Hamilton, a mesma tem sido uma valiosa heurística” e que um modelo preciso para seleção de parentesco precisaria ser desenvolvido, um talvez que considerasse a coevolução entre a cooperação e a seleção de parentesco (Nowak, 2012).

5.2 Reciprocidade Direta

“Uma mão lava a outra.”
Ditado popular

Anteriormente vimos que a evolução da cooperação num grupo de indivíduos aparentados é favorecida seja porque ao ajudar um parente você estaria favorecendo indiretamente genes oriundos de uma descendência comum, seja porque a chance desta ajuda ser retribuída mais adiante é maior do que se a mesma fosse direcionada a um completo desconhecido.

Mas como explicar a cooperação entre indivíduos não aparentados? Ou em outras palavras, o altruísmo? De acordo com Trivers (1971, p. 35), “comportamento altruísta pode ser definido como um comportamento que beneficia outro organismo não aparentado, enquanto sendo aparentemente danoso para o organismo que esteja o executando.”

A resposta para estas perguntas se resume, a uma única palavra: reciprocidade.

É importante distinguir duas formas de reciprocidade: a direta e a indireta. A reciprocidade direta é aquela baseada na experiência pessoal e direta com os parceiros, enquanto a, indireta, envolve obter informações sobre os potenciais parceiros a partir das observações da interação destes com outros indivíduos ou coletar informações sobre a reputação do comportamento destes indivíduos com outros (Henrich & Henrich, 2007).

Inicialmente, será abordado o mecanismo da reciprocidade direta.

De acordo com Trivers (1971), sob certas condições, a seleção natural favoreceria o altruísmo, pois no longo prazo haveria benefícios para o indivíduo que se comporta de uma forma altruísta. Estas condições se resumem: (1) aos indivíduos poderem se reconhecer um ao outro, (2) de um mecanismo que possa manter registrado as interações passadas e (3) dos altruístas poderem direcionar a sua ajuda a aqueles que os ajudaram no passado.

Trivers foi o primeiro a estabelecer a importância da repetição ou iteração no dilema do prisioneiro para possibilitar a evolução da cooperação na biologia (Nowak, 2011; Hammerstein, 2001).

Paralelamente ao trabalho de Trivers, Auman (1959) mostrando a importância da interação num dilema dos prisioneiros infinitamente repetido, concluiu que as possibilidades da cooperação são múltiplas, complexas, e não podem ser analisadas de forma simplista (Fiani, 2009). Este resultado foi chamado de “Teorema Popular” por Auman. Apesar de poderoso, o mesmo não detalhava a forma correta ou as melhores estratégias que deveriam ser empregadas neste jogo (Nowak, 2011).

Coube a William D. Hamilton e, principalmente, a Robert Axelrod, mostrarem a melhor estratégia a ser empregada num dilema do prisioneiro iterado, (Axelrod & Hamilton, 1981; Axelrod, 2006). O mérito de Axelrod, que não criou a teoria clássica da cooperação em jogos repetidos, foi de conseguir tornar um assunto restrito ao campo da teoria dos jogos, compreensível para os demais cientistas (Hammerstein, 2001).

Para isso, dois torneios computacionais foram organizados, onde vários participantes, 14 no primeiro torneio e 62, no segundo, foram convidados a submeterem algoritmos computacionais que deveriam decidir por um comportamento cooperativo ou egoísta em decorrência do movimento(s) do seu adversário num dilema do prisioneiro iterado.

Estudiosos de diversas áreas participaram desses torneios e várias estratégias foram submetidas, das mais simples às mais complexas. Aquela que se sagrou campeã nos dois casos, foi o *Tit-for-Tat* (TFT), que consiste em começar cooperando, e nas interações subsequentes, repetir a jogada do oponente na interação imediatamente anterior.

Para verificar, a robustez da estratégia TFT, Axelrod ainda criou seis torneios hipotéticos, cada qual com diferentes distribuições das estratégias participantes, e pautando-se numa lógica evolutiva, de que a estratégia mais apta deixaria um número maior de

descendentes, observou que a estratégia TFT conseguiu se sagrar campeã em cinco desses torneios, ficando em 2º lugar em um deles (Axelrod, 2006).

O impacto do trabalho de Axelrod na comunidade científica foi tão grande que pode ser observado, pela evolução do número de citações referentes a ele após 1984. Esses valores podem ser observados no gráfico a seguir:

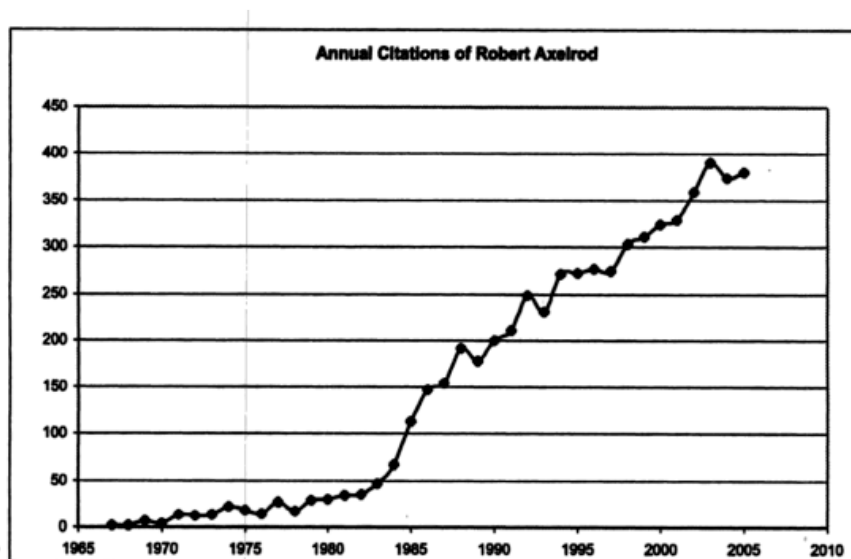


Figura 5 - Evolução de citações anuais a Robert Axelrod (Axelrod, 2006, p. xv)

Segundo Axelrod (2006), as características que fizeram a estratégia TFT se sobressair em relação às demais podem ser enumeradas em quatro:

- I) Nunca ser o primeiro a não cooperar (*niceness*);
- II) Possuir a capacidade de retaliar uma não cooperação na mesma moeda;
- III) Saber perdoar, ou seja, caso ocorra o arrependimento após uma não cooperação, e o oponente volte a cooperar, então, o TFT também voltaria a cooperar (*forgiveness*);
- IV) Ser uma estratégia compreensível que permita ao oponente entender de imediato no que se resume esta estratégia.

As principais conclusões de Axelrod e Hamilton, relacionados a reciprocidade direta, cooperação e seleção, estão contidas no modelo de Axelrod e Hamilton, no qual, por meio de um jogo evolutivo, mostram-se quais seriam as condições para a evolução da cooperação, considerando-se as seguintes premissas: (1) dilema do prisioneiro iterado, (2) inexistência de

uma agregação favorável em decorrência do parentesco e (3) estratégia com o comportamento dependente da história de interação desta estratégia com as demais.

Considerando as premissas acima, vamos delinear este modelo mediante uma situação bem simples. Imagine um cenário em que indivíduos adotassem apenas duas estratégias quando o assunto é cooperação, sendo a primeira nunca cooperar (ALLD), e outra representada pela estratégia *Tit-for-Tat* (TFT).

Admita que os indivíduos nesta população joguem o dilema do prisioneiro iterado de dois jogadores, sendo que cada par é selecionado aleatoriamente. O ato cooperativo implica numa redução de c da aptidão do cooperador; em contrapartida, o receptor da cooperação ou aquele que foi ajudado, acabará tendo um impacto positivo de b na sua aptidão, sendo que $b > c > 0$.

A representação matricial deste jogo pode ser observada abaixo:

		Coluna	
		Cooperar (C)	Não Cooperar (D)
Linha	Cooperar (C)	$b-c ; b-c$	$-c ; b$
	Não Cooperar (D)	$b ; c$	$-c ; -c$

Quadro 8 – Matriz de recompensas no dilema do prisioneiro com dois jogadores (elaborado pelo autor)

Considere que exista um fator de desconto w que representa em que grau as recompensas de cada movimento são descontadas em relação ao movimento anterior, ou seja, w será o peso do próximo movimento relativo ao movimento atual (Axelrod, 2006).

Considerando que a frequência de TFT nesta população seja de h , isto implica que a de ALLD será de $1-h$. Logo, as aptidões esperadas de cada estratégia ao fim de uma rodada, $V_1(\text{estratégia focal} | \text{estratégia outra})$, considerando uma aptidão basal de W_0 para todas, serão:

$$\begin{aligned}
 W_1(ALLD) &= W_0 + hV_1(ALLD | TFT) + (1-h)V_1(ALLD | ALLD) \\
 W_1(ALLD) &= W_0 + hb + (1-h)0 \\
 W_1(ALLD) &= W_0 + hb
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
 W_1(TFT) &= W_0 + hV_1(TFT | TFT) + (1-h)V_1(TFT | ALLD) \\
 W_1(TFT) &= W_0 + h(b-c) - (1-h)c \\
 W_1(TFT) &= W_0 + hb - c
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Já a recompensa esperada de cada estratégia numa série de infinitas interações, considerando que o próximo movimento tenha um peso w frente ao movimento atual será:

$$\begin{aligned}
W(ALLD) &= W_0 + hV(ALLD | TFT) + (1-h)V(ALLD | ALLD) \\
W(ALLD) &= W_0 + h(b + 0w + 0w^2 + \dots) + (1-h)(0 + 0w + 0w^2 + \dots) \quad (30) \\
W(ALLD) &= W_0 + hb
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W(TFT) &= W_0 + hV(TFT | TFT) + (1-h)V(TFT | ALLD) \\
W(TFT) &= W_0 + h(b - c + (b - c)w + (b - c)w^2 + \dots) + (1-h)(-c + 0w + 0w^2 + \dots) \quad (31) \\
W(TFT) &= W_0 + h\left(\frac{b - c}{1 - w}\right) - (1 - h)c
\end{aligned}$$

Para avaliar a evolução da cooperação neste contexto, vamos estudar quando a estratégia TFT seria uma estratégia evolutivamente estável, ou seja, quando uma população de TFT resistiria a uma invasão de um mutante ALLD. Assim, fazendo h aproximadamente a 1, temos:

$$\begin{aligned}
W(TFT) &> W(ALLD) \\
wb &> c \quad (32)
\end{aligned}$$

Portanto, quando a influência do futuro ponderado pelo benefício advindo da cooperação for maior do que o custo da cooperação, então a cooperação poderia evoluir pelo mecanismo da reciprocidade direta. Observe que esta condição é semelhante a regra de Hamilton ($rb > c$).

O parâmetro w está associada a uma distribuição geométrica. Esta distribuição estatística está relacionada a contar o número de falhas até que se obtenha o sucesso.

No nosso caso, a variável aleatória associada a esta distribuição seria o número de encontros da díade, enquanto a ideia de falha estaria relacionada a continuidade da díade por mais uma rodada, por sua vez sucesso, se refere a descontinuidade da díade.

Denotando por R a variável aleatória do número de interações da díade, temos que a sua função de probabilidade geométrica com probabilidade de sucesso (interrupção da interação da díade) $1 - w$ será dada por:

$$P(R = r) = w^{r-1}(1 - w), \text{ sendo que } r = 1, 2, 3, \dots \quad (33)$$

Se desejássemos, e.g., saber qual é a probabilidade de uma díade ter seis encontros quando w for igual a 0,4, basta substituir na fórmula 33, e encontraríamos:

$$P(R = 6) = 0,4^5(1 - 0,4) = 0,6\%$$

As fórmulas da esperança e da variância da variável aleatória R com distribuição geométrica com probabilidade de sucesso $1 - w$ são dadas por:

$$E[R] = \frac{1}{1-w} \quad (34)$$

$$V[R] = \frac{w}{(1-w)^2} \quad (35)$$

Mediante as fórmulas 34 e 35, podemos montar a tabela 4 que fornece o número esperado de encontros ou rodadas e o seu respectivo desvio-padrão em função de alguns valores de w . Observe que os desvios-padrão assumem valores próximo à sua média para valores de w iguais a 0,95 e 0,99.

w	$E[R]$	Desvio-Padrão $[R]$
-	1,00	-
0,05	1,05	0,24
0,10	1,11	0,35
0,20	1,25	0,56
0,50	2,00	1,41
0,90	10,00	9,49
0,95	20,00	19,49
0,99	100,00	99,50

Tabela 4 – A esperança e o desvio-padrão de uma variável aleatória R com distribuição geométrica para diversos valores de w (elaborado pelo autor)

Podemos também associar o parâmetro w a uma ideia de estabilidade dos pares, (McElreath & Boyd, 2007), ou o efeito da incerteza associada ao futuro (Axelrod, 1984).

Mas, quais são os efeitos do futuro capturados pelo w ? De acordo com Axelrod (2006, p. 126), o parâmetro w “reflete duas razões que fazem com que o futuro é geralmente menos importante que o presente. Primeiramente, a interação pode não continuar... Uma segunda razão é que os indivíduos tipicamente preferem obter um dado benefício hoje, ao invés de esperar pelo mesmo benefício até amanhã. A combinação de ambos efeitos fazem com que o próximo movimento seja menos importante do que o movimento atual.”

Logo, uma forma de entender melhor o w seria decompô-lo nos dois efeitos mencionados por Axelrod. Isso pode ser encontrado em Rasmusen (2001, p. 406-7), onde, “sendo a probabilidade de o jogo terminar a cada repetição dada por θ e a taxa de preferência temporal dada por δ ”, o fator de desconto w seria dado por:

$$w = \frac{1-\theta}{1+\delta} \quad (36)$$

Logo, considerando a decomposição do w nos efeitos representados por $1 - \theta$ e δ , concluímos que, para b e c constantes, o altruísmo teria mais condições de se propagar se

houvesse ou um aumento da chance da continuidade da relação $1 - \theta$ e/ou se os indivíduos descontassem pouco o futuro (δ pequeno).

Quando fazemos δ igual a zero, o valor de w será igual a chance da continuidade da relação. Autores como McElreath e Boyd (2007, p. 126), descrevem o w como simplesmente a “chance em cada rodada de outra interação ocorrer”. Ao fazerem isso, deixam de mencionar o efeito do desconto do futuro.

Apesar da robustez da estratégia TFT mostrada até aqui, a mesma se torna muito vulnerável na presença de erros, sejam eles decorrentes da implementação da ação ou por uma percepção equivocada da ação, independentemente do tipo de erro, implementação ou percepção, o resultado final acaba sendo a não cooperação.

Ao considerar a existência de erros, Nowak e Sigmund (1992) por meio de uma simulação computacional, semelhante ao torneio promovido por Axelrod (2006), concluíram que a estratégia TFT atuaria como um catalisador para a cooperação e pavimentaria o caminho para uma estratégia mais “generosa” que o TFT, o qual eles chamaram de GTFT (TFT Generoso), que implica em responder cooperação com cooperação, e quando confrontado com um ato de não cooperação, cooperaria em média a cada um de três encontros, sendo esse valor médio dependente das recompensas utilizadas na simulação, ou pelas palavras de Nowak e Highfield (2011, p. 41) “GTFT trabalha desta forma: nunca esquece um ato de cooperação, mas ocasionalmente se esquece de um ato de não cooperação”.

Apesar da superioridade da estratégia GTFT sobre a TFT na existência de erros, a mesma não consiste em uma Estratégia Evolutivamente Estável, pois, por meio de um processo de mutação e de dreiva, uma população de GTFT poderia tender para uma população de ALLC e, neste ponto, o ciclo se repetiria, i.e., com a mutação certa, um raro ALLD poderia invadir esta nova população, e conseqüentemente, esta população de ALLD seria então substituída pela por outra de estratégia TFT, e que por sua vez, pavimentaria o caminho mais uma vez para a GTFT.

Nowak e Sigmund (1993) estudaram o impacto dos erros na evolução da cooperação pela reciprocidade direta, e por meio, novamente, de simulações computacionais, mostraram que uma estratégia, a qual eles denominaram de Pavlov, seria mais robusta que o GTFT na presença de erros.

A estratégia Pavlov se resume a seguinte ideia: permaneça com a estratégia vencedora, caso contrário, mude a *win-stay, lose-shift* (WSLS). O sucesso desta estratégia se baseia em

duas propriedades, a saber: lidar bem com os erros e ter a capacidade de explorar os cooperadores incondicionais, sendo que esta segunda propriedade preveniria que populações de Pavlov pudessem se enfraquecidas por cooperadores incondicionais que poderiam servir de porta de entrada para estratégias não cooperativas (Nowak & Sigmund, 1993).

Apesar da robustez da estratégia Pavlov na presença de erros em comparação com o GTFT e o TFT, a mesma, ainda poderia ser minada e, eventualmente, substituída (Nowak & Highfield, 2011). Todo o ciclo anteriormente descrito pode ser resumido na figura 6.

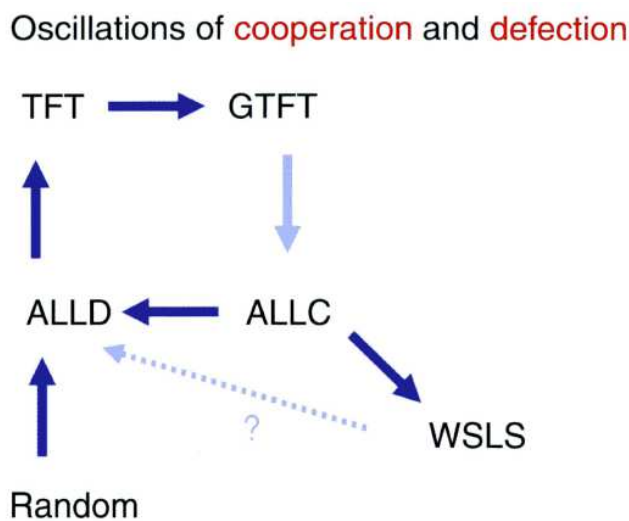


Figura 6 – Ciclo contínuo entre cooperação e não cooperação (extraído de Nowak, 2006a, p. 91)

De uma forma geral, McElreath e Boyd (2007) mostram que seria possível desestabilizar qualquer estratégia pela combinação correta de estratégias mutantes.

Por fim, Henrich e Henrich (2007) enfatiza que soluções baseadas na reciprocidade direta são raras no resto da natureza, mas abundante e diversa nas sociedades humanas. Isso decorre do nosso mecanismo evoluído de reconhecimento (Axelrod, 2006), habilidades cognitivas avançadas (Nowak, 2011) e/ou da forte dependência da nossa espécie na aprendizagem cultural (Henrich & Henrich, 2007).

5.3 Reciprocidade Indireta

“Melhor perder um olho do que ter uma má reputação”
Ditado Grego

Durante muito tempo a necessidade de manter uma boa reputação era e continua sendo de importância fundamental para as pessoas. Esta questão é algo tão universal que pode ser visto na forma de uma sabedoria popular através de provérbios de inúmeros povos.

Atualmente a questão da boa reputação é muito mais complicada em decorrência da complexidade da vida moderna e também muito mais importante. Manter uma boa reputação não se restringe apenas aos vizinhos. Hoje em dia, ter o nome limpo na praça para obtenção de crédito é questão crucial para todos, ser bem avaliado nas redes sociais pode ser benéfico em termos pessoais (Tennie, Frith & Frith, 2010) ou em termos comerciais (Standifird, 2001). Alguns autores até já consideram uma propriedade na era das economias virtuais (Blocher, 2009).

Mas, qual é a participação da reputação como mecanismo para a promoção da cooperação?

O conceito da reputação é a peça central quando se trata sobre a reciprocidade indireta. Basicamente, um indivíduo irá cooperar com o outro unicamente com base no bom nome que este carrega, já que cooperar com alguém que tenha um histórico de cooperação pode ser benéfico ao promover uma boa reputação perante os outros indivíduos do grupo, e assim, poder obter futura cooperação de desconhecidos.

Podemos comparar a reciprocidade direta como uma economia de escambo com base na troca imediata de bem, enquanto que a reciprocidade indireta se assemelha a invenção do dinheiro (Nowak, 2006b).

Um dos primeiros a utilizar o mecanismo da reciprocidade indireta para explicar a cooperação humana em grandes grupos foi, segundo McElreath e Boyd (2007), Richard Alexander em 1987 no seu *The Biology of Moral System*. Ainda segundo estes autores, houve muito ceticismo na época e somente em meados da década de 90 Martin Nowak e Karl Sigmund conseguiram mostrar que o argumento de Alexander era de fato convincente.

Mas o que é de fato reputação? De acordo com Tennie, Frith & Frith (2010, p. 482), reputação é, do ponto de vista das teorias evolutivas, um “dos muitos sinais que fornecem informações sobre provável comportamento de um indivíduo”. É sobre esta pedra angular que a seleção poderia vir a favorecer estratégias que visassem ajudar indivíduos que ajudaram outros no passado (McElreath & Boyd, 2007).

Neste ponto é interessante diferenciar a reciprocidade direta, abordada anteriormente, da indireta. Na reciprocidade direta, um dado indivíduo focal irá interagir com outro durante um número desconhecido de rodadas esperando que o auxílio provido numa dada rodada seja retribuído pelo mesmo indivíduo numa rodada futura, ou seja, na reciprocidade direta a díade envolvida será sempre a mesma. Já no caso da reciprocidade indireta, as díades serão sempre

diferentes, ou seja, um indivíduo A colabora com um indivíduo B para futuramente poder obter colaboração de outro indivíduo C.

Segundo Rand e Nowak (2013), para que o mecanismo da reciprocidade indireta possa funcionar são necessários alguns pré-requisitos, a saber: encontros repetidos dentro da população e que terceiros possam observar alguns desses encontros ou possam obter conhecimento deles de alguma forma, por exemplo, por fofoca. O problema é que o mesmo indivíduo poderia ter uma reputação diferente a partir dos olhos de diferentes indivíduos (Nowak & Sigmund, 1998).

Diante da situação descrita, vamos assumir que exista uma probabilidade q de que um dado indivíduo focal conheça de fato a reputação do seu oponente, ou em outras palavras, q se refere à chance do indivíduo focal estar correto na sua avaliação.

Nestas condições, Nowak e Sigmund (1998a, 1998b) mostraram que para que o mecanismo da reciprocidade indireta possa resultar na cooperação seria necessário que:

$$qb > c \quad (37)$$

Sendo que b e c se referem, respectivamente, ao benefício advindo da cooperação e ao custo da cooperação.

Ainda de acordo com estes autores, para definir uma estratégia de reciprocidade indireta é preciso especificar como as reputações seriam atualizadas após as interações (norma social) juntamente com uma regra de ação (Ohtsuki & Iwasa, 2004, 2006).

Para ilustrar a ideia de norma social vamos utilizar o seguinte exemplo: imagine uma população em que os indivíduos possuam uma reputação que pode ser Boa (B) ou Ruim (R). Uma norma social consiste em regras de atualização da reputação do indivíduo focal por parte de um observador externo, sendo que o indivíduo focal será aquele que deverá decidir entre cooperar ou não cooperar mediante as reputações envolvidas, no caso, a sua e a de quem receberia a ajuda. Abaixo é apresentada uma possível norma social:

Ações possíveis do indivíduo focal	Reputação do indivíduo focal (negrito) seguida do recebedor da ajuda			
	Boa Boa	Boa Ruim	Ruim Boa	Ruim Ruim
Cooperar	boa*	ruim	Ruim	boa
Não cooperar	ruim	ruim**	Ruim	ruim

Quadro 9 - Exemplo de uma norma social (elaborado pelo autor)

A título de ilustração das informações apresentadas na tabela acima, vamos tomar duas células desta tabela em especial, no caso aquela em que se encontra a reputação boa* e a ruim**. No caso da célula boa*, temos a situação em que o nosso indivíduo focal tem uma boa reputação e ao cooperar com outro indivíduo que também apresente uma boa reputação. Aos olhos de um terceiro observador, terá a reputação avaliada como boa*.

Para a célula em que consta a informação ruim**, o indivíduo focal com uma boa reputação escolhe negar ajuda ou não cooperar com outro indivíduo que se encontra com a reputação ruim. Nestas condições, o nosso observador externo atribuirá uma reputação ruim** para o nosso indivíduo focal.

É importante frisar que a tabela anterior é apenas uma das diversas normas sociais possíveis, mais precisamente $2^8 = 256$. O raciocínio por trás deste valor decorre que o observador externo pode apenas atribuir duas reputações possíveis para o nosso indivíduo focal (B ou R), mas como são necessárias 8 situações possíveis para definirmos uma norma social (célula sombreada), pelo princípio fundamental da contagem, haveria 256 normas possíveis neste caso.

Uma regra de ação estabelece ou normatiza o comportamento de um indivíduo focal, que pode ser de cooperar ou não cooperar, ao interagir com outro indivíduo, considerando as reputações envolvidas, no caso, a dele e a do outro, para que aos olhos de um observador externo ele possa manter ou obter uma boa reputação. Por exemplo, uma regra de ação poderia ser a seguinte:

	Reputação do indivíduo focal (negrito) seguida do receptor da ajuda			
Ação prescrita para o indivíduo focal	Boa Boa	Boa Ruim	Ruim Boa	Ruim Ruim
	Cooperar	Não Cooperar	Cooperar	Não Cooperar

Quadro 10 - Exemplo de uma regra de ação (elaborado pelo autor)

Novamente salienta-se que a tabela anterior é apenas uma das diversas regras de ação possíveis, mais precisamente teríamos $2^4 = 16$. O raciocínio por trás deste valor decorre que o indivíduo focal pode escolher sempre entre duas ações para as quatro possíveis combinações de reputação entre ele e o receptor da ajuda.

Perceba que ao se considerar todas as normas sociais possíveis (256) combinadas com todas as regras de ações possíveis (16), acaba-se tendo um total de 4.096 estratégias

relacionadas a reciprocidade indireta. Desse total, algumas seriam evolutivamente estáveis e, assim poderiam favorecer a cooperação, e outras, não.

Ohtsuki e Iwasa (2004) mostraram que dessas 4.096 estratégias apenas 8 são evolutivamente estáveis e, assim, poderiam favorecer a cooperação por meio da reciprocidade indireta. As oito estratégias representadas pelas suas normas sociais e as suas regras de ação se encontram descritas no quadro 11:

		Reputação do Indivíduo Focal (Negrito) seguida do Recebedor da ajuda			
		Boa Boa	Boa Ruim	Ruim Boa	Ruim Ruim
Ações Possíveis do Indivíduo Focal	Cooperar	Boa	*	Boa	*
	Não Cooperar	Ruim	Boa	Ruim	*
Ação prescrita para o indivíduo focal (Regra de ação)		Cooperar	Nunca cooperar independente de *	Cooperar	Cooperar apenas se a sequência dos ** forem, respectivamente, Boa e Ruim

Quadro 11 - As oito estratégias evolutivamente estáveis (adaptado de Ohtsuki & Iwasa, 2006, p. 438)

Do quadro 11, temos apenas três caselas, aquelas que se encontram sombreadas, com livre atribuição para a reputação do indivíduo focal. Logo, pelo princípio da contagem, teríamos $2^3 = 8$ estratégias possíveis. Segundo Ohtsuki e Iwasa (2004), as principais características que distinguem estas oito estratégias das demais são, a saber: (i) cooperação com indivíduos com boa reputação resulta em boa reputação, enquanto a não cooperação com estas mesmas pessoas, numa reputação ruim, e (ii) a não cooperação contra indivíduos com reputação ruim é considerado como um comportamento bom, pois funcionaria como uma sanção.

Boa parte das pesquisas relacionadas a reciprocidade indireta se volta particularmente para jogos envolvendo muitos jogadores, dentre eles, um dos principais é o jogo de bem público. Nele os jogadores devem contribuir com certo valor em prol de um bem que será usado por todos. Posteriormente, o total arrecadado será distribuído igualmente a todos os participantes, seja em recursos, seja em usufruir o bem público financiado com estes recursos. O grande problema neste tipo de jogo é a presença dos *free-riders* de primeira (caronistas), que são indivíduos que não contribuem, mas usufruem do recurso.

Uma importante distinção é relacionada aos *free-riders* de primeira ordem e os de segunda ordem. Os *free-riders* de segunda ordem se referem aos cooperadores que deixam de punir os *free-riders* de primeira ordem e conseqüentemente deixam de incorrer no custo de

punição. Panchanathan e Boyd (2003, 2004) mostram por um modelo baseado no jogo de bens públicos que a cooperação e a solução do problema dos *free-riders* de primeira e segunda ordem seriam possíveis por meio da reputação. Alencar, Siqueira & Yamamoto (2008) apontam que o tamanho do grupo é impactante na evolução da cooperação no jogo de bem público, pois em grupos menores indivíduos seriam mais eficientes em controlar e retaliar os seus pares do que em grupos maiores.

Lazzarini, Madalozzo, Artes e Siqueira (2005) mostram que a confiança que uma pessoa estabelece com a outra, fator importante quando pensamos sobre a cooperação com estranhos, estaria correlacionado com importantes variáveis como a taxa de crescimento econômico e o nível de investimento.

Pfeiffer et al. (2012), ao permitir que a reputação pudesse ser transacionada como se fosse uma mercadoria, ou seja, comprada ou vendida, num dilema do prisioneiro iterado de dois jogadores, concluem que as pessoas são capazes de avaliar explicitamente o valor material de ter uma boa reputação e, poderiam, por exemplo, optar em não seguir normas sociais ou até poriam a sua reputação em risco se os benefícios individuais são grandes o suficiente.

Todos estes trabalhos, como muitos outros que poderiam ser citados, apontam o papel central da reciprocidade indireta e da reputação na evolução humana (Rand & Nowak, 2013).

5.4 Seleção Multinível

“Não pode haver dúvida de que uma tribo, incluindo muitos membros que estejam sempre prontos para dar ajuda uns aos outros e se sacrificar para o bem comum, seria vitoriosa sobre outras tribos, e esta seria a seleção natural.”

Charles Darwin

A ideia de seleção de grupo teve como um de seus grandes marcos a publicação do livro *Animal Dispersion in Relation to Social Behavior* de V. C. Wynne-Edwards (Wynne-Edwards, 1967). Para Wynne-Edwards, a seleção favoreceria um comportamento individual egoísta. Paralelamente a isto, haveria outra(s) força(s) que contrabalançaria(m) a força de seleção sobre os indivíduos impedindo que populações sem restrições reprodutivas se extinguissem. A essa força ele chamou de seleção de grupo (Wynne-Edwards, 1967).

A ideia de seleção de grupo foi duramente criticada na época e até mesmo a sua negação foi aceita a longo de décadas (Nowak & Sigmund, 2007).

Mais recentemente, houve um ressurgimento das controvérsias geradas pela ideia de seleção de grupo (McElreath & Boyd, 2007) sob a alcunha de seleção multinível (Nowak, 2006b).

Atualmente, aceita-se que a seleção multinível pode ser um dos mecanismos que favoreceria a evolução da cooperação (Boyd & Richerson, 2002; Henrich, 2004; Bowles & Gintis, 2004; Kerr & Godfrey-Smith, 2002).

Na seleção multinível, a unidade de seleção passa de indivíduo para o grupo. Da mesma forma que os indivíduos competem entre si, na seleção multinível, a competição ocorre entre grupos (Nowak, 2012). Apesar de ainda ocorrer uma seleção que se dá dentro de cada grupo, entre indivíduos, sendo que os não cooperadores dominariam os cooperadores, ocorre também outra seleção entre grupos, onde grupos de cooperadores seriam superiores a grupos de não cooperadores (Rand & Nowak, 2013).

West, Griffin & Gardner (2006) diferenciam a seleção de grupo entre a visão antiga da seleção de grupo da visão nova. Essa diferença pode ser melhor compreendida pela figura 7:

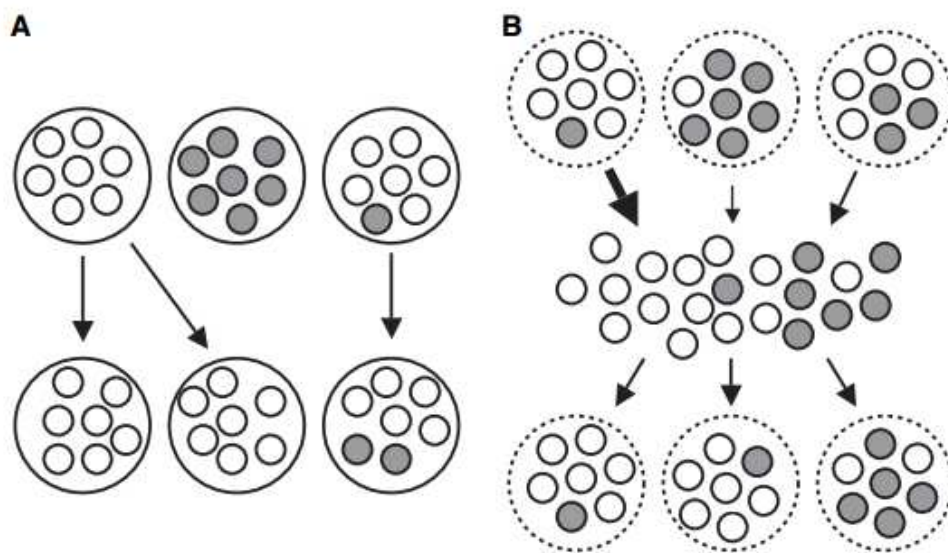


Figura 7 - Antiga (A) e nova (B) visão da seleção de grupo (West, Griffin & Gardner, 2006)

No painel A da figura acima, temos a visão antiga da seleção de grupo. Os círculos menores hachurados correspondem a não cooperadores e os não hachurados, a cooperadores. Nesta visão, os grupos são bem definidos e existe pouco fluxo entre os grupos, ou seja, pouca migração. A competição ocorre entre os grupos e os grupos com mais cooperadores tendem a se espalhar, não impedindo que não cooperadores possam se espalhar dentro dos grupos.

Ainda da figura anterior, no painel B, vemos que os grupos não estariam bem definidos (linha tracejada). Conseqüentemente, o fluxo migratório seria maior. Os diferentes grupos contribuiriam de maneiras diferentes num *pool* reprodutivo a partir do qual, novos grupos

poderiam ser formados. Traulsen e Nowak (2006) veem a migração como uma espécie de “ruído” na seleção de grupo.

As diferenças entre estas duas visões foram sintetizadas na tabela 5 com base em West, Griffin e Gardner (2006):

Visão Antiga de Seleção de Grupo	Visão Nova de Seleção de Grupo
Seleção entre populações (interdêmica)	Seleção dentro da população (intradêmica)
Unidade de seleção é o grupo	Múltiplos níveis de seleção
Foco na evolução dos traços do grupo	Foco na evolução dos traços dos elementos do grupo

Tabela 5 - Diferença entre a visão antiga e nova da seleção de grupos

Independentemente da visão escolhida, nova ou antiga, a evolução da cooperação seria favorecida em ambas (West, Griffin & Gardner, 2006).

Dentre as diversas formas de tratar ou modelar matematicamente a seleção multinível, encontra-se a equação de Price que conduz para uma descrição da seleção natural numa série de níveis concatenados ou hierárquicos: entre genes dentro de um indivíduo, entre indivíduos dentro de um grupo, e entre grupos (McElreath & Boyd, 2007), ou seja, essa expansão recursiva permitiria qualquer outra partição possível (Frank, 1998).

Outro resultado que é interessante mencionar vem da modelagem apresentada por Traulsen e Nowak (2006). Nela uma população misturada de cooperadores e não cooperadores é subdividida em m grupos. Dentro de cada grupo, os indivíduos interagirão em termos de um jogo evolucionário. A cada rodada, um indivíduo da população inteira é escolhido para se reproduzir, e isso, tomando como base a sua aptidão total. Os descendentes, então, são incorporados ao mesmo grupo do indivíduo. Se um grupo atinge um total de n indivíduos, então com uma probabilidade h , os elementos deste grupo são alocados aleatoriamente em dois grupos menores, e outro grupo escolhido aleatoriamente é eliminado, fazendo com que o número total de grupos se mantenha constante em m . Mas outro destino pode ser dado a este grupo que atingiu n elementos, com probabilidade complementar $1 - h$. Um indivíduo escolhido aleatoriamente deste grupo é eliminado. O resultado curioso obtido com este modelo é que esta dinâmica populacional irá favorecer a evolução da cooperação se:

$$\left(1 + \frac{n}{m}\right)^{-1} b > c \quad (38)$$

Ou seja, se a razão entre benefício e custo do ato altruísta exceder 1 mais a razão entre o tamanho do grupo e o número de grupos na população. Focando a análise apenas nos

parâmetros n e m , temos que a cooperação seria favorecida quando menor fosse a razão n/m . Isso seria possível num cenário envolvendo grupos pequenos (baixo valor de n) ou uma quantidade grande de grupos (alto valor de m). Num cenário limite, se tivermos m muito maior do que n , então, a razão n/m seria próxima a 0, e a condição para que a cooperação possa evoluir se reduzirá simplesmente a $b > c$, que é a condição básica para a evolução de qualquer comportamento altruísta.

Uma extensão do resultado anterior é quando ao modelo é permitida a migração de indivíduos entre grupos, sob uma seleção fraca e com uma baixa probabilidade de ocorrer, a divisão de um grupo quando este atinja um número superior a n (h muito pequeno).

Neste caso, sendo z o número médio de migrantes decorrentes de um grupo durante a sua vida, onde a vida de um grupo é definida como o tempo da fundação do grupo até a sua extinção causada pela sua divisão, temos que a condição para evolução da cooperação será agora de:

$$\left(1 + \frac{n}{m} + z\right)^{-1} b > c \quad (39)$$

Alguns experimentos têm mostrado o importante papel da competição entre grupos como fator para promoção da cooperação dentro dos grupos (Puurtinem & Mappes, 2009; Hausken, 2000; Burton-Chellew, Ross-Gillespie & West, 2010), apesar de críticos da seleção multinível argumentarem que empiricamente as condições necessárias para uma substancial pressão seletiva ainda não apareceram ao longo da história humana (Williams, 1966).

5.5 Seleção Espacial

Em populações bem misturadas, onde a interação entre dois indivíduos quaisquer se torna equiprovável a cooperação apenas poderia evoluir em decorrência de um dos mecanismos já citados anteriormente. O papel destes mecanismos seria de garantir uma agregação não aleatória, mas positiva, de um cooperador com outro cooperador. Isso poderia se dar, por exemplo, via parentesco ou por meio da reputação. Por outro lado, o que aconteceria se as populações não fossem bem misturadas? E se dentro da população pudessemos encontrar *clusters* de cooperadores ou de não cooperadores, sejam eles formados por conta de uma proximidade espacial ou como resultado de uma rede social? O que ocorreria com a evolução da cooperação neste caso?

É fácil imaginar que a existência de *clusters*, favoreceria uma agregação positiva entre as estratégias de mesma natureza, e assim, cooperadores teriam mais chances de interagir com cooperadores, obtendo assim recompensas maiores comparados com os não cooperadores. É essa a principal ideia da seleção espacial.

A estrutura populacional, conceito chave dentro deste tipo de seleção, se refere à maneira como ocorrerá as interações e como se dará as competições (Nowak, 2012). A escolha da estrutura populacional pode favorecer a evolução da cooperação num ambiente onde existam apenas as duas estratégias mais simples e clássicas que são sempre cooperar (ALLC) e nunca cooperar (ALLD) sem a necessidade da existência de nenhum outro mecanismo auxiliar ou estratégia mais complexa (Nowak & May, 1992).

A estrutura populacional pode se referir a uma distribuição geográfica ou a uma rede social. Além disso, ela pode ser estática ou dinâmica (Rand & Nowak, 2013).

Um dos primeiros trabalhos sobre a seleção espacial e a evolução da cooperação foi de Nowak e May (1992). Nele, foram considerados apenas duas estratégias sempre cooperar (ALLC) e nunca cooperar (ALLD) distribuídos ao longo de um espaço bidimensional, $n \times n$, o equivalente a um tabuleiro com diversas caselas. Em cada rodada, um indivíduo interagia com os seus vizinhos imediatos, sendo as recompensas parametrizadas em função de b seguindo um dilema do prisioneiro de dois jogadores. Ao final da rodada, todos os ganhos e perdas destas interações eram computadas.

No começo da próxima rodada, a regra de ocupação de cada casela tomava como base a maior pontuação na rodada anterior do seu antigo dono e dos seus vizinhos mais próximos. Aquele com o maior valor passava a ser o novo dono daquela casela. A variação do valor de b impactava diretamente no comportamento e na configuração do sistema. Por exemplo, se $1,8 < b < 2$, então *clusters* de cooperadores poderiam ser observados dentro de bolsões de não cooperadores e vice-versa (Nowak & May, 1992).

A figura 8 representa um exemplo de seleção espacial retirado de Ohtsuki, Hauert, Lieberman e Nowak (2006), onde numa população de quatorze indivíduos consistindo de cooperadores e não cooperadores interagindo ao longo de uma rodada, tem a posição pertencente a um não cooperador (D) sendo substituído por um cooperador (C). Neste exemplo, um cooperador ajuda todo o indivíduo a ele conectado com um benefício de b e a um custo pessoal de c . Um não cooperador nunca proverá ajuda. Logo, nunca incorrerá em nenhum custo.

Por fim, a cada rodada, um indivíduo escolhido aleatoriamente irá adotar a estratégia do seu vizinho mais bem-sucedido ou com a maior aptidão.

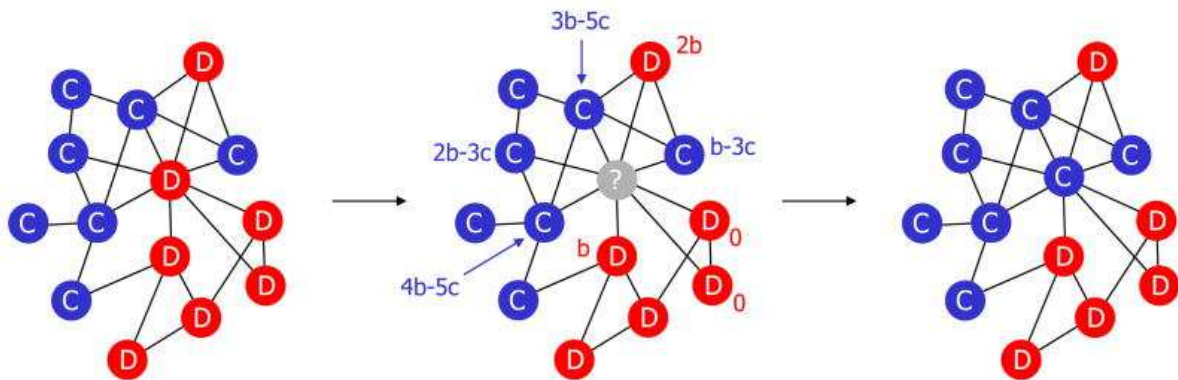


Figura 8 - Exemplo de Seleção Espacial (Ohtsuki, Hauert, Lieberman & Nowak, 2006)

Ohtsuki, Hauert, Lieberman e Nowak (2006) também mostram que se a desigualdade abaixo, deduzida para grafos regulares e com $N \gg k$, lê-se N muito maior do que k , ocorrer:

$$k^{-1}b > c \quad (40)$$

Ou em outras palavras, se a razão benefício e custo for maior do que k , sendo que k representa o número de médio de vizinhos ou a conectividade média, então a cooperação poderia ser favorecida em decorrência de uma dinâmica evolutiva. Mas as simulações realizadas por eles mostraram que esta desigualdade é necessária, mas não suficiente, sendo a discrepância muito maior para grafos não regulares e com alto valor de k .

Evidências experimentais sobre o favorecimento da cooperação mediante uma seleção espacial entre humanos têm sido bem variadas (Rand & Nowak, 2013). Estes trabalhos abrangem desde aqueles que fornecem evidências sobre a importância da estrutura populacional na cooperação, (Apicella et al., 2012), como aqueles que mostram justamente o contrário (Gracia-Lázaro et al., 2012).

6. O DILEMA DO PRISIONEIRO E O PROBLEMA DA COOPERAÇÃO

Dentre os mecanismos descritos, para os objetivos desta tese, iremos nos focar na reciprocidade direta.

Em virtude disto, retomaremos o dilema do prisioneiro, ponto crucial para a evolução da cooperação por este mecanismo.

A ideia é aprofundarmos a discussão deste jogo e apresentar alguns desdobramentos possíveis que poderiam ser derivados do caso mais simples que é o de dois jogadores.

Nos próximos capítulos, serão retomados alguns pontos já discutidos sobre este dilema, mas acrescidos de uma formalização matemática maior. Este rigor será importante para entender as diversas derivações que esse caso simples pode gerar, além de, ajudar a compreender o modelo proposto por esta pesquisa.

6.1 Dilema do prisioneiro de dois jogadores e com uma única rodada

O dilema do prisioneiro vem sendo estudado por diversas áreas da ciência como o paradigma na evolução da cooperação, pois a sua essência representa a clássica luta entre cooperação e conflito, entre o grupo e o indivíduo.

O dilema do prisioneiro clássico surgiu em 1950 e foi proposto por Merrill Flood e Melvin Dresher (Luce & Raiffa, 1957). Nesta versão, dois indivíduos são mantidos presos em duas celas separadas após serem detidos como suspeitos de terem cometido um crime. As autoridades decidem interrogá-los separadamente e a ambos é oferecida a opção de delatar ou não o outro. Caso você o delate e ele não faça o mesmo, a sua pena seria, por exemplo, de um ano e a do outro, quatro anos de prisão. O inverso seria o mesmo, ou seja, ele o delatando e você não. Caso, ambos delatem um ao outro, a pena de cada seria de 3 anos de prisão. Por fim, a não delação mútua resultaria num período de apenas dois anos na prisão. Perceba que em todos os casos a delação promoveria uma redução da pena de quem o fizesse como uma forma de prêmio pela cooperação com as autoridades. A representação matricial deste jogo pode ser observada abaixo, sendo que o sinal de menos na frente de cada valor implica os anos no cárcere:

		Coluna	
		Cooperar com seu Companheiro (C)	Delatar ou Não Cooperar com o seu companheiro(D)
Linha	Cooperar com seu Companheiro (C)	-2;-2	-4;-1
	Delatar ou Não Cooperar com o seu companheiro(D)	-1;-4	-3;-3

Quadro 12 - Matriz de recompensas e análise de equilíbrio do dilema do prisioneiro de dois jogadores um exemplo numérico (elaborado pelo próprio autor)

Neste jogo a estratégia delatar é a melhor escolha independente da escolha do outro jogador. Por exemplo, para o jogador linha, caso a opção do jogador coluna fosse delatar o seu companheiro (D), a melhor escolha para o jogador linha seria também de delatar (D); caso contrário, ele teria que ficar quatro anos encarcerado, sendo que poderia ficar apenas três anos. Se, por outro lado, a escolha do jogador coluna fosse de cooperar com o outro ou de não o delatar (C). Ainda assim, o jogador-linha obtém um melhor resultado se ele optasse em delatar o seu companheiro (D), ou seja, ficaria apenas um ano de prisão, ao invés de dois anos, caso optasse em delatar também.

Utilizando o mesmo raciocínio, ou seja, analisando este jogo sob a perspectiva do jogador-coluna, concluímos rapidamente que, nesta situação, a delação mútua seria o resultado final deste jogo, ou seja, no final ambos ficariam três anos na prisão. Mas, por outro lado, se ambos tivessem ficado calados, a pena seria apenas de dois anos. Ou seja, a cooperação mútua teria resultado em penas menores do que a delação mútua.

É importante mencionar que, como apresentado no capítulo 4, apesar do exemplo anterior poder assumir outros valores, a seguinte relação fundamental deveria ser respeitada para que o problema seja caracterizado como sendo o dilema do prisioneiro de uma única rodada, i.e.:

$$V(D|C) > V(C|C) > V(D|D) > V(C|D).$$

Sob o ponto de vista de um dos prisioneiros, os possíveis resultados serão sempre ordenados da seguinte forma:

delatar o cooperador > cooperação mútua > delação mútua > cooperar com delator.

O dilema do (nosso) prisioneiro se mostraria muito claro na relação acima, ou seja, cooperar com o outro, podendo obter a segunda melhor recompensa neste jogo, mas correndo o risco de ser delatado e ter que “pagar o pato”, ou delatar o outro podendo, assim, obter a melhor recompensa do jogo, mas podendo também, obter a terceira pior recompensa.

Para o dilema do prisioneiro iterado que nada mais é do que M repetições do dilema do prisioneiro de uma única rodada, onde M é um número aleatório inteiro e positivo. Além da relação fundamental, é introduzida mais uma condição.

Esta condição é:

$$2V(C|C) > V(C|D) + V(D|C) > 2V(D|D). \quad (41)$$

Ela nos diz que dois cooperadores gerariam um resultado somado maior do que o obtido por um cooperador e um não cooperador, assegurando que uma alternância entre C e D durante um jogo repetido não seja superior do que uma estratégia cooperativa C (Mesterton-Gibbons, 1992; McElreath & Boyd, 2007).

Além disso, o pior resultado conjunto obtido seria a combinação de dois não cooperadores. Outra forma de expressar a condição anterior é:

cooperação mútua > um prisioneiro cooperando > delação mútua.

A desigualdade 41, também nos diz que, do ponto de vista do grupo, os ganhos maiores seriam obtidos se houvesse a cooperação mútua (ambos cooperarem). Em outras palavras, a cooperação geraria sempre o maior ganho conjunto independentemente das outras combinações possíveis.

Ao adicionar esta nova condição, percebe-se que o dilema que antes era de um prisioneiro, passaria a ser um dilema dos prisioneiros. Já que do ponto de vista individual, de cada prisioneiro, a melhor escolha seria a de não cooperar. Por outro lado, do ponto de vista coletivo, a cooperação seria a opção a ser almejada pelos prisioneiros.

Mesmo com a adição desta nova condição, o resultado esperado deste jogo ainda continuaria sendo a delação mútua, pois, de acordo com a primeira condição, não importa o que o seu companheiro faça a sua melhor resposta ainda continua sendo a não cooperação.

6.2 Dilema do prisioneiro alternado e iterado

Segundo Trivers (1971, p. 39), “altruísmo recíproco pode ser visto como uma simbiose, onde cada parceiro ajuda o outro enquanto ele ajuda a si mesmo. A simbiose tem defasamento

temporal, i.e., um parceiro ajuda o outro e precisa esperar um período de tempo até a sua vez de ser ajudado.”

Por outro lado, existem exemplos de ajuda mútua onde as ações dos dois jogadores são simultâneas. O exemplo mais conhecido é descrito por Milinski (1987) sobre a inspeção do predador por um par de peixes da família *Gasterosteidae* (*stickleback*).

No final das contas, tanto o dilema do prisioneiro alternado, i.e., com jogadas alternadas, quanto o simultâneo, i.e., com jogadas simultâneas, são relevantes para o altruísmo recíproco.

No entanto, segundo Nowak e Sigmund (1994, p. 219), “o dilema do prisioneiro alternado e simultâneo são duas situações bem diferentes, e a literatura inteira existente é baseada no jogo simultâneo.”

Assim, em virtude do escasso material sobre o tema e sendo Nowak e Sigmund (1994) uns dos artigos seminais que abordam o dilema do prisioneiro alternado, nós iremos nos balizar especificamente neste artigo para definir formalmente esta modalidade de jogo.

Primeiramente, a grande diferença no dilema do prisioneiro alternado é que a simetria do caso simultâneo é quebrada. Passa-se a ter a figura de um líder que é capaz de decidir qual deverá ser o resultado do jogo. No caso, o líder seria o jogador com a 2ª ordem de jogada.

A diferença se torna flagrante principalmente na presença de erros. Considere dois TFTs engajados num dilema do prisioneiro iterado. Num primeiro caso, ambos estão num jogo simultâneo. Se por acaso, numa dada rodada ocorrer um erro, então, uma sequência de cooperação e não cooperação se seguirá para ambos os jogadores.

Por outro lado, caso o jogo fosse alternado, o que se observaria seria uma sequência de não cooperação para ambos os jogadores.

Estas duas situações podem ser vistas na figura 9 onde o apóstrofo indica a ocorrência de um erro.

(i) The simultaneous game
 Player 1 *CCCD'CDCD ... DD'DD ... DC'D ... DC CC ...*
 Player 2 *CCCC DCDC ... CD DD ... DD C ... CC'CC ...*

(ii) The alternating game
 Player 1 *C C D' D D D...D C' C C C...*
 Player 2 *C C D D D D...D C C C C...*

Figura 9 – O efeito do erro no dilema do prisioneiro iterado com jogadas simultâneas e alternadas (extraído de Nowak e Sigmund (1994))

Nowak e Sigmund (1994) realizam a distinção de dois tipos de dilema do prisioneiro alternado. O primeiro assume que os papéis são trocados em todos os encontros: este é o dilema do prisioneiro estritamente alternado. Um outro caso seria quando os papéis fossem alternados casualmente. Este segundo caso é usualmente mais realista. A essa segunda situação, eles denominam como um dilema do prisioneiro randomicamente/estocasticamente alternado.

Para a formalização do dilema do prisioneiro alternado Nowak e Sigmund (1994) tomam como referência o líder, já que é ele que define o resultado do jogo.

Para isso admita que o líder tem duas escolhas: Cooperar (C) ou Não Cooperar (D). Se o líder optar em cooperar (C), ele recebe uma recompensa de a e o oponente uma recompensa de b . Se por sua vez, a escolha do líder seja de não cooperar (D), então, neste caso, a sua recompensa será de c , enquanto a do oponente, de d .

Nowak e Sigmund (1994) sempre assumem que:

- (i) $c > a$ (ii) $c - a < b - d$

A condição (i) significa que numa única rodada, a opção de não cooperar para o líder será sempre o melhor do que a opção cooperar. A condição (ii) que juntamente com (i) implica simplesmente que $b > d$, i.e., para o oponente será sempre melhor que o líder coopere.

Considere agora uma “unidade” que equivale a duas rodadas consecutivas no jogo alternado. Observe que duas rodadas consecutivas de um jogo alternado equivalem a uma rodada de um jogo simultâneo.

Sob a suposição de um dilema do prisioneiro estritamente alternado, cada jogador será o líder uma vez.

Se ambos optarem pela cooperação (C), ambos receberão uma recompensa de $a + b$ em uma unidade. Se ambos optarem pela não cooperação, ambos receberão $c + d$. Se um jogador jogar C e o outro D, então o não cooperador receberá $c + b$ e o cooperador $a + d$. Estas recompensas podem ser vistas no quadro 13.

		Oponente	
		C	D
Focal	C	$a+b, a+b$	$a+d, c+b$
	D	$c+b, a+d$	$c+d, c+d$

Quadro 13 – Tabela de Recompensas de um dilema do prisioneiro alternado com duas rodadas (elaborado pelo autor)

Desde que $T > R > P > S$ e $S + T < 2R$ são as duas condições que definem um dilema do prisioneiro simultâneo iterado, podemos tentar relacioná-las com as condições (i) e (ii).

Para isso basta lembrar que:

$$R = a + b; P = c + d, T = c + b \text{ e } S = a + d$$

Observe que a condição (i) $c > a$ implica que $P > S$ e $T > R$, enquanto a condição (ii) $c - a < b - d$ implica que $R > P$ e $S + T < 2R$. Portanto, as condições (i) e (ii) do dilema alternado equivale às condições $T > R > P > S$ e $S + T < 2R$ do dilema do prisioneiro simultâneo iterado.

Por outro lado, se R, T, S e P são dados como $R = a + b; P = c + d, T = c + b$ e $S = a + d$, então necessariamente tem se que:

$$T + S = P + R, \text{ Condição (iii).}$$

Conseqüentemente, segue que nem todo dilema do prisioneiro simultâneo iterado corresponde a um dilema do prisioneiro alternado iterado, e.g., os valores utilizados por Axelrod (1991) no seu torneio $T = 5, R = 3, P = 1$ e $S = 0$ não se manteriam para o caso alternado. Mas, para todo dilema do prisioneiro alternado iterado haveria um correspondente do caso simultâneo iterado.

Talvez uma forma mais concisa de caracterizar um dilema do prisioneiro simultâneo ou alternado iterado seja atribuir a $T = b, R = b - c, P = 0$ e $S = -c$. Ao parametrizarmos T, R, P e S desta forma, garantimos a condição (iii) e o dilema se restringiria as condições (i) e (ii), que seriam asseguradas se $b > c > 0$.

Para a nossa simulação, vamos utilizar $b = 4$ e $c = 1$ que equivale a $T = 4$, $R = 3$, $P = 0$ e $S = -1$, valores que satisfazem as condições (i), (ii) e (iii). Além disso, nos restringiremos a análise do dilema do prisioneiro estritamente alternado.

6.3 Dilema do prisioneiro de n jogadores

“Cada homem está preso num sistema que o compele a aumentar o seu rebanho sem limites – num mundo que é limitado. Ruína é o destino para o qual todos os homens se dirigem, cada um perseguindo o seu próprio interesse numa sociedade que se baseia na liberdade dos comuns. A liberdade neste caso traz a ruína para todos.”

(Garret Hardin em A tragédia dos comuns)

Será que se aumentarmos o número de jogadores no dilema do prisioneiro, poderíamos com isso melhorar as chances do comportamento cooperativo? O indivíduo em grupos maiores poderia estar mais disposto a cooperar?

Talvez o exemplo que melhor ilustre o dilema do prisioneiro de n jogadores seja o caso da tragédia dos comuns escrito por Garret Hardin e publicado na Science em 1968. Neste problema, existe um pasto comum que é compartilhado por diversos criadores. Do ponto de vista de cada criador, seria interessante manter a maior quantidade e durante o maior tempo possível o seu rebanho sobre esta pastagem.

Imagine que diversos fatores (doenças, conflitos etc.) tenham limitado o crescimento do rebanho e do número de criadores de tal forma que este pasto conseguiu durante todo esse tempo suprir as necessidades do rebanho. Neste aspecto, Hardin traça uma comparação entre os recursos limitados do nosso planeta e a teoria de crescimento populacional de Malthus.

Contudo, como comenta Hardin (1968), chegaria um momento em que esse equilíbrio seria quebrado, pois esse pasto comum começaria a se tornar insuficiente para cada criador. Neste ponto, Hardin (1968, p. 1244) continua, “a lógica inerente dos comuns geraria, sem nenhuma piedade ou remorso, a tragédia.” Ou seja, do ponto de vista racional, cada criador procuraria maximizar os seus ganhos e isso se traduziria em colocar um animal adicional no pasto. O problema é que esse seria o raciocínio de todos os outros criadores e nisso consiste a tragédia dos comuns.

Novamente, temos o clássico conflito entre o individual, não cooperar, versus o coletivo, cooperar. Porém, neste caso, ao invés de uma díade, estamos lidando com grupos com três ou mais organismos idênticos (clones). Neste tipo de jogo, a recompensa obtida por um indivíduo dependerá do comportamento de todos os membros do grupo.

Para caracterizar esse jogo, conforme Boyd e Richerson (1988), vamos considerar um grupo formado por n indivíduos. Cada indivíduo pode optar em cooperar (C) ou não cooperar (D). Sejam $V(C|i)$ e $V(D|i)$ as recompensas dos indivíduos que cooperam e não cooperam dado que i dos n indivíduos no grupo escolhem cooperar. Utilizando uma função monotonicamente crescente para caracterizar as aptidões do cooperador e do não cooperador.

As funções de aptidão de cada estratégia em função do número de cooperadores podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} V(C|i) &= \left(\frac{B}{n}\right)i - c \\ V(D|i) &= \frac{B}{n}i \end{aligned} \quad (42)$$

Sendo que B é o benefício produzido por cada cooperador durante o jogo e C é o custo individual incorrido por cada cooperador durante o jogo.

É importante salientar que diferentemente do dilema do prisioneiro de dois jogadores, nesta versão de n jogadores, preferiu-se utilizar a letra maiúscula B para designar o benefício, pois aqui o mesmo terá um cunho mais coletivo, i.e., um benefício compartilhado por todos do grupo, ou seja, um bem público.

Para que esse jogo possa ser caracterizado como um dilema do prisioneiro de n jogadores, algumas condições devem ser satisfeitas em relação às recompensas:

(1) Semelhante ao dilema do prisioneiro de dois jogadores, cada organismo estará melhor ao escolher não cooperar, independentemente do que os outros organismos do grupo tenham escolhido. Isso pode ser expresso pela seguinte desigualdade:

$$V(D|i) > V(C|i+1), \quad i=0, \dots, n-1. \quad (43)$$

A melhor forma de entender a desigualdade acima, seria a partir de seu lado direito. Nele temos a recompensa esperada de um cooperador dado que ele se encontra num grupo em que i outros indivíduos cooperam. A parcela $+1$ de $i+1$ corresponde ao fato dele cooperar. Se este indivíduo mudar da cooperação para a não cooperação, a sua recompensa será maior; nesta nova situação, o número de cooperadores no grupo será reduzido de um indivíduo, no caso, o nosso indivíduo focal e equivalerá simplesmente a i .

Outra forma de expressar a desigualdade, mediante a substituição das funções de aptidão especificadas anteriormente, seria:

$$\begin{aligned}
 V(D|i) &> V(C|i+1) \\
 \frac{B}{n}i &> \frac{B}{n}(i+1) - c \\
 c &> \frac{B}{n}
 \end{aligned}
 \tag{44}$$

(2) Se um indivíduo “troca” da não cooperação para cooperação, todos os membros do grupo ficariam numa situação melhor. Isto requer:

$$V(D|i+1) > V(D|i) \tag{45}$$

$$V(C|i+1) > V(C|i) \tag{46}$$

Substituindo uma das desigualdades pelas funções de aptidão e simplificando, da mesma forma como fizemos em (1), temos:

$$\begin{aligned}
 V(D|i+1) &> V(D|i) \\
 \frac{B}{n}(i+1) &> \frac{B}{n}i \\
 \frac{B}{n} &> 0
 \end{aligned}
 \tag{47}$$

(3) A aptidão do grupo aumenta se um membro do grupo “troca” da não cooperação para a cooperação. Isto requer:

$$(i+1)V(C|i+1) + (n-i-1)V(D|i+1) > iV(C|i) + (n-i)V(D|i) \tag{48}$$

Usando o mesmo raciocínio de (1) e (2) em (3), temos:

$$\begin{aligned}
 (i+1)V(C|i+1) + (n-i-1)V(D|i+1) &> iV(C|i) + (n-i)V(D|i) \\
 B &> c
 \end{aligned}
 \tag{49}$$

Logo, uma forma mais compacta de caracterizar um dilema do prisioneiro de n jogadores seria simplesmente através da seguinte desigualdade, sendo a mesma, oriunda das três condições anteriormente descritas:

$$B > c > \frac{B}{n} > 0 \tag{50}$$

Esta condição pode ser expressa da seguinte forma:

$$nB > nc > 1B > 0. \tag{51}$$

Ou seja, um dilema do prisioneiro de n jogadores é caracterizado quando o benefício total nB se todos cooperarem, for superior ao custo total nc . Além disso, esse custo total nc deve ser superior ao benefício auferido se existir apenas um único cooperador no grupo. Observe que a existência do termo (B/n) serve para garantir que o custo individual seja estritamente positivo e assintoticamente igual a zero.

Os trabalhos envolvendo a cooperação no dilema do prisioneiro de n jogadores têm mostrado que as condições para permitir a evolução da cooperação se tornam extremamente restritiva quando os grupos se tornam maiores (Boyd & Richerson, 1988), não se observando o efeito do tamanho do grupo (Frazer, 1995) ou que não existe uma simples relação entre tamanho de grupo e cooperação, i.e., esta relação pode ser positiva ou negativa dependendo da forma como as recompensas do grupo e do indivíduo são afetadas pelo tamanho dos grupos (Bonacich, Shure, Kahan & Meeker, 1976).

6.4 Dilema do Prisioneiro Contínuo e Iterado

O dilema do prisioneiro tem o poder em sintetizar a tênue tensão entre a cooperação e a competição, entre o individual e o grupal, o mesmo, ainda poderia ser considerado um modelo relativamente simples por não considerar diversos aspectos do jogo.

Assim, uma limitação que isso gera no dilema do prisioneiro iterado tradicional é que as iterações acabam sendo discretas, onde cada agente ou jogador pode escolher apenas entre duas opções: cooperar ou não cooperar. Em outras palavras, não seria possível, por exemplo, optar por gradações no nível da cooperação (e.g.: cooperar um pouco, cooperar um pouco mais/menos etc.).

A ideia de um dilema do prisioneiro contínuo e iterado, onde os jogadores poderiam optar por diferentes gradações no nível de cooperação, estaria mais próximo da realidade, por exemplo, o comportamento de catação do impala (*Aepyceros melampus*) ou da ave Airo (*Uria aalge*) poderiam ser traduzidos melhor por um dilema do prisioneiro iterado com investimento e recompensa variável (Connor, 1995) do que por um jogo discreto, ou seja, em muitos casos é mais preciso considerar um ajustamento contínuo do comportamento de um dos agentes em função da resposta do outro, implicando a existência de graus de cooperação que poderia estar entre 0% e 100% (Freen, 1996).

O dilema do prisioneiro contínuo e iterado foi abordado inicialmente por Verhoeff (1993) e Mar & St. Denis (1994) com uma maior preocupação no seu aspecto computacional do que no âmbito da evolução social. Apesar de serem um dos precursores, o tema ganha

relevância com Frean (1996) que procura avaliar se as mesmas conclusões obtidas no caso discreto seriam ou não mantidas no caso contínuo. Dentre as principais conclusões de Frean (1996) está na existência de uma forte similaridade entre estes dois casos, por exemplo, observa-se que no caso contínuo da mesma forma que no caso discreto, estratégias na forma de TFT ainda se mostram como um modelo robusto de comportamento para a evolução da cooperação.

Já as diferenças apontadas por Frean (1996) surgem ao se avaliar a questão do “timing”, ou seja, se as jogadas são simultâneas ou alternadas, e também, quando consideramos o nível de memória dos agentes, por exemplo, um agente que toma uma decisão pautada apenas na decisão imediatamente anterior do outro agente, é de acordo com o autor dotado de uma memória 1, já aquele agente que, além disso, considera também a sua decisão na rodada imediatamente anterior, passa a ser dotado de uma memória 2, no caso da memória, diferentes tipos de estratégias emergem se é utilizada uma memória 2, seja no caso discreto ou no contínuo.

Essa linha de pesquisa, o dilema do prisioneiro contínuo e iterado, apenas foi retomada dois anos depois com o artigo de Doebeli e Knowlton (1998). Em Doebeli e Knowlton (1998) mostra-se através de simulações, que uma das formas do comportamento mutualístico entre espécies evoluir, é por meio da associação de uma estrutura espacial adequada entre hospedeiro e simbiote com um modelo que incorpora a ideia de investimentos crescentes. Para eles, o dilema do prisioneiro contínuo e iterado, além de ser mais condizente com a realidade, ao contrário do caso discreto, seria o único modelo que poderia explicar a evolução deste tipo de comportamento

Vale mencionar que, no modelo de Doebeli e Knowlton (1998), a estratégia de investimento é baseada na recompensa, ao contrário dos outros modelos que serão apresentados, que se baseiam no custo ou investimento incorrido pelo outro jogador.

Ainda em 1998, Roberts e Sherratt (1998) argumentam que o caso contínuo favoreceria e incentivaria uma diminuição gradual no nível de investimento da parte dos agentes, possibilitando o surgimento de uma forma mais sutil de não cooperação, e isto, fatalmente corroeria a cooperação. Para contornar isto, eles propõem uma nova estratégia denominada ‘*Raise-the-Stakes*’ (RTS). Ela ofereceria pouca “cooperação” no primeiro encontro e, se caso fosse correspondida, aumentaria gradualmente o nível de investimento na relação. Consequentemente, quando mais um altruísta investisse numa dada rodada, muito mais o RTS

iria investir na próxima. Abaixo segue tabela detalhando a regra de comportamento subjacente a estratégia RTS, considerando um jogo alternado e cabendo ao RTS a primeira jogada.

		Se o investimento do outro jogador, em relação ao do RTS, for:		
		Menor	Igual	Superior
Ação do RTS	Investimento Inicial Um valor pequeno	Agir como um TFT, ou seja, diminuir também da mesma quantidade o investimento na próxima rodada.	Do total investimento anteriormente acrescer de uma constante k , onde $k > 0$.	Do total investimento anteriormente acrescer de uma constante $2k$, onde $k > 0$.

Tabela 6 – Regra de comportamento subjacente a estratégia *Raise-the-Stakes* (elaborado pelo autor)

De acordo com Roberts e Sherratt (1998), “a prática de ‘testar o terreno’ ao invés de cooperar integralmente com ‘os olhos fechados’ reforça a estabilidade e a efetividade da reciprocidade”. É nisso que se apoia o RTS.

Os resultados obtidos por Roberts e Sherratt (1998) mostram que ao se iniciar com uma mistura de estratégias, sendo uma delas a já conhecida ALLD (nunca cooperar) e a outra o RTS, esta última consegue se espalhar e se fixar, podendo invadir uma população tendo como a maioria de ALLDs e, além disso, conseguindo resistir a invasões depois de estabelecido/fixado na população.

Contestando Roberts e Sherratt (1998), Killingback e Doebeli (1999) apontam que ao permitir que a seleção pudesse atuar sobre os parâmetros de uma população de RTS, a mesma tenderia a evoluir para uma população de não cooperadores, fazendo com que a cooperação baseada no RTS não seja um fenômeno robusto. Respondendo a Killingback e Doebeli (1999), Sherratt e Robert (1999a) argumentam que depois de tentarem replicar as simulações realizadas por Killingback e Doebeli (1999) não foi possível verificar a erosão da cooperação como apontada por eles, fazendo com que Sherratt e Robert (1999a) sugerisse que tenha ocorrido uma má interpretação ou um mau entendimento por parte destes pesquisadores da forma como a estratégia RTS funcionasse.

Com intuito de explorar outras possibilidades além do RTS, Sherratt e Robert (1999b) munidos de um algoritmo de busca genética, examinaram um imenso rol de estratégias que pudessem ser bem-sucedidas no dilema do prisioneiro contínuo e iterado. Das simulações, observou-se que os indivíduos evoluíam para evitar o risco, procurando investir relativamente pouco em estranhos e melhorando os seus investimentos perante parceiros altruístas. Também foi possível observar que o nível ótimo do investimento é uma função de benefícios e custos envolvidos no ato de cooperação.

Outros pontos que valem a pena mencionar do trabalho de Sherratt e Robert (1999b) é que se observou um aumento da generosidade, traduzida por um nível maior de investimentos, com um aumento na probabilidade da continuidade da relação que equivale a um aumento no número de rodadas. Por outro lado, um aumento na probabilidade de ocorrência de erros, sejam de percepção ou de implementação, faria com que os agentes se tornassem mais cautelosos ou menos generosos.

Por fim, Sherratt e Robert (1999b, 425) concluem que “nós demonstramos pela primeira vez que estratégias semelhantes ao RTS emergem e competem bem contra uma larga faixa de estratégias alternativas num jogo com investimento variável análogo ao jogo do dilema do prisioneiro iterado.”

Na mesma linha do trabalho de Sherratt e Robert (1999b), Wahl e Nowak (1999a) também pesquisaram quais deveriam ser as qualidades que estratégias bem-sucedidas deveriam ter num dilema do prisioneiro contínuo e iterado. Para isso, eles parametrizaram o dilema do prisioneiro possibilitando assim obterem soluções analíticas juntamente com outras advindas da simulação. O que chama mais a atenção das conclusões obtidas por Wahl e Nowak (1999a) é que boa parte delas contrasta com aquelas obtidas por Roberts & Sherratt (1998), Sherratt & Robert (1999a) e Sherratt & Robert (1999b).

Para Wahl & Nowak (1999a) estratégias LRS que são equilíbrio de Nash num dilema do prisioneiro contínuo e iterado compartilham de três características:

1) Generosidade. Neste ponto, semelhante ao RTS, esta qualidade sempre permitirá que o jogo se mova para níveis maiores de cooperação ao aumentarem o investimento à medida que ocorra correspondência por parte do outro jogador.

2) Otimismo. Neste caso, ao contrário de Roberts & Sherratt (1998), Sherratt & Robert (1999a) e Sherratt & Robert (1999b), observou-se que estas estratégias são consistentemente otimistas com o outro jogador, e assim, procuram maximizar o investimento inicial, sendo esta oferta inicial um fator decisivo no dilema do prisioneiro contínuo. São estratégias, que, ao contrário do RTS, não ‘testam o terreno’, ao invés disso, procuram cooperar integralmente, com ‘os olhos fechados’. Mas, se, por acaso, o oponente não coopera, estas estratégias imediatamente respondem com um segundo movimento muito baixo, podendo subir os investimentos gradualmente.

3) Intransigência. Finalmente, a terceira característica é que estas estratégias são intransigentes, ou seja, elas oferecerão cooperação total no primeiro movimento, mas posteriormente não

cooperarão integralmente/inteiramente a menos que o seu oponente faça o mesmo. Esta característica é crucial para garantir que estas estratégias não sejam exploradas por jogadores que consistentemente reduzem o nível de cooperação.

Sobre os resultados obtidos por Roberts e Sherratt (1998), Wahl e Nowak (1999a, p. 318) comentam que:

“uma direta comparação com os nossos resultados é difícil, porque as estratégias usadas por Robert e Sherratt são formuladas de uma forma diferente. Nossas estratégias NE (equilíbrio de Nash), contudo, oferecem inteira cooperação como movimento inicial, para estratégias que oferecem algo menos que a completa cooperação como um movimento inicial não são NE no nosso modelo, mas podem ser invadidas por estratégias que oferecem um valor inicial maior; isto parece ser o caso da formulação de Robert e Sherratt.”

É interessante notar que apesar de Wahl & Nowak (1999a) justificar a diferença entre os resultados obtidos ser em decorrência na diferença das formulações, pode-se questionar dois pontos: será que isto seria suficiente para explicar estas conclusões tão antagônicas, ou seja, para Wahl & Nowak (1999a) estas estratégias teriam que ser otimistas. Já Roberts e Sherratt (1998) advogam a necessidade de que estas estratégias sejam cautelosas. Mesmo que a explicação de Wahl & Nowak (1999a) justificasse estas diferenças, ainda permaneceria mais uma pergunta: Afinal de contas, deve-se adotar uma postura mais otimista ou mais cautelosa num dilema do prisioneiro contínuo e iterado? Quais são as condições que ensejam uma ou outra postura?

Assim como Sherratt & Robert (1999b), Wahl & Nowak (1999b) avaliaram como a presença de erros alterariam as conclusões obtidas do trabalho anterior. Da mesma forma que o trabalho anterior, as qualidades da estratégia ser otimista, generosa e intransigente ainda são necessárias para que as estratégias cooperativas consigam resistir à invasão dos não cooperadores. Contudo, a presença de erros faz com que o equilíbrio no jogo deixe de ser estável, já que, apesar das estratégias cooperativas serem resistentes a invasão de não cooperadores, as mesmas são vulneráveis à invasão de estratégias mais cooperativas que eventualmente se tornam a porta de entrada para os não cooperadores. Logo, de acordo com Wahl & Nowak (1999b), o que se observa é um ciclo interminável entre cooperação e não cooperação.

Chama atenção até o momento, a dificuldade observada em conciliar as conclusões obtidas por estas pesquisas.

Com essa ideia em mente, Sherratt & Roberts (2002) se propõem a reconciliar os resultados dessas diversas pesquisas. Um resultado interessante desse artigo de 2002 trata da

possibilidade da população que adote a estratégia Raise-the-Stakes (RTS) poder evoluir numa forma mais simples de estratégia, equivalente ao TFT, chamada por Sherratt e Roberts (2002) de Dar tanto quanto você consegue (“*Give-as-Good-as-you-Get*” ou GGG) que inicialmente oferece o máximo investimento inicial e subsequentemente retribui na mesma “quantidade” o investimento recebido do outro jogador. A evolução do RTS para uma estratégia GGG somente ocorrerá se as mutações forem pequenas e raras. A estratégia GGG não é uma estratégia evolutivamente estável, pois semelhante ao jogo discreto, ela é susceptível à invasão de estratégias cooperativas ingênuas (ALLC) e, por sua vez, são um convite para as estratégias não cooperativas.

Outro ponto apontado por Sherratt e Roberts (2002) é que, mesmo havendo a possibilidade da evolução da estratégia RTS para uma GGG, as estratégias RTS ainda seriam selecionadas se os indivíduos tivessem uma limitação do total que eles pudessem investir ao longo do seu ciclo de vida aliado a uma presença constante de alguns não cooperadores na população, mas que apenas isso não explicaria o baixo investimento que é feito geralmente com estranhos.

Abaixo é reproduzido na íntegra o quadro-resumo apresentado em Sherratt & Roberts (2002, p. 47) no qual são apresentadas as principais premissas e resultados dos artigos publicados, até então, sobre a estabilidade da cooperação em sistemas não espaciais envolvendo investimento variável:

Referência	Contexto	Jogo Simultâneo /Alternado	Presença de Erros?	Relação Custo-Benefício	Variação no investimento	Investimento numa dada rodada: p – sua recompensa (<i>payoff</i>) anterior; i – seu investimento anterior; j – o investimento anterior do outro; d, a, b, K – constantes	Regra de seleção	Conclusões
<i>Doebeli & Knowlton (1998)</i>	Cooperação inter-específica	Simultâneo	Não	Não linear Custo \propto investimento	Continuamente variável	$a + bp$ se $p \geq 0$ 0 se $p < 0$. (investimento inicial a)	Novas estratégias são criadas por pequenas mutações	Cooperação não estável num modelo não espacial
<i>Roberts & Sherratt (1998)</i>	Cooperação intra-específica	Alternado	Não	Linear, geralmente sem limite superior para o investimento Custo = investimento	Descontinuamente variável	$i + b$ (se $i = j$), $i + 2b$ (se $i < j$), j (se $i > j$), (investimento inicial a)	Torneio com estratégias fixadas	Cooperação estável
<i>Killingback & Doebeli (1999)</i>	Cooperação intra-específica	Alternado	Não	Linear, sem limite superior para o investimento Custo = investimento	Continuamente variável	$i + b$ (se $i = j$), $i + 2b$ (se $i < j$), j (se $i > j$), (investimento inicial a)	Novas estratégias são criadas por pequenas mutações	Cooperação não estável num modelo não espacial
<i>Sherratt & Roberts (1999a)</i>	Cooperação intra-específica	Alternado	Não	Linear, sem limite superior para o investimento Custo = investimento	Continuamente variável	$i + b$ (se $i = j$), $i + 2b$ (se $i < j$), j (se $i > j$), (investimento inicial a)	Novas estratégias são criadas por pequenas mutações	Cooperação estável: estratégias evoluem quantitativamente para uma forma de TFT, que oferece um alto investimento inicial
<i>Sherratt & Roberts (1999b)</i>	Cooperação intra-específica	Alternado	Sim	Linear, com limite superior para o investimento Custo = investimento	Descontinuamente variável	Função derivada de i e j	Novas estratégias são criadas por recombinações, pequenas e grandes mutações	Cooperação estável: estratégia evolui para uma forma de “Raise-the-Stakes” com investimento inicial intermediário
<i>Wahl & Nowak (1999a)</i>	Cooperação intra-específica	Alternado	Não	Linear, com limite superior para o investimento Custo \propto investimento	Continuamente variável	$d + Kj$ (investimento inicial x)	Novas estratégias são criadas por pequenas e grandes mutações	Cooperação transiente: quando presente ela é quantitativamente sensível com alto investimento inicial
<i>Wahl & Nowak (1999b)</i>	Cooperação intra-específica	Alternado	Sim	Linear, com limite superior para o investimento Custo \propto investimento	Continuamente variável	$d + Kj$ (investimento inicial x)	Novas estratégias são criadas por pequenas e grandes mutações	Cooperação transiente ou parte do polimorfismo. Quando presente ela é quantitativamente sensível com alto investimento inicial

Tabela 7 – Resumo das investigações sobre a estabilidade da cooperação em sistemas não espaciais com investimento variável (Extraído de Sherratt & Roberts, 2002, p. 47)

Apesar da tentativa em reconciliar os resultados dos vários trabalhos, ainda podem ser observadas incoerências entre as afirmações feitas por Sherratt & Roberts (2002) e as conclusões de Wahl & Nowak (1999a,b).

Primeiramente, Sherratt e Roberts (2002, p. 55) nos diz que “Wahl & Nowak (1999a) examinaram a evolução dos parâmetros através de uma regra de reposta de investimento LRS, ainda assim, similarmente encontraram que eventualmente as estratégias cooperativas bem sucedidas, quando ocorrem, se assemelhavam à GGG.”. Mas, como já citado, eventualmente estas estratégias cooperativas bem-sucedidas para Wahl & Nowak (1999a), ao contrário de um apenas retribuir o investimento anterior (GGG), seriam generosas, ou nas palavras de Wahl e Nowak (1999a, p. 318) “nós notamos que o equilíbrio cooperativo de Nash em nosso modelo procura aumentar os investimentos quando confrontada com uma estratégia que é inicialmente reticente em colaborar... Em particular, esta generosidade implica que essas estratégias dão algo por nada [$S(0) > 0$]”. Este último comportamento, dar algo por nada, dificilmente poderia ser atribuído a um GGG ou TFT.

Outro ponto questionável observado diz respeito à estabilidade do equilíbrio, para Sherratt e Roberts (2002, p. 52) “RTS geralmente evoluirá para GGG...ela (estratégia GGG) é susceptível à invasão por meio de um processo de *drift* ou deriva por uma gama de estratégias menos responsivas e mais ingênuas como ALLC. Este *drift* em direção ao aumento da ingenuidade (ou “fraca estabilidade”) ...resulta num colapso intermitente da cooperação.”

Sobre a estabilidade do equilíbrio, Wahl e Nowak (1999a, p. 317) afirmam “concordamos que muitas estratégias no nosso espaço de estratégias evoluem em direção a total não cooperação (ALLD), mas encontramos algumas notáveis exceções a esta tendência... Esses equilíbrios de Nash são um conjunto de estratégias cooperativas que recebem a máxima recompensa quando jogadas contra elas mesmas, e ainda são nem suscetíveis a invasão por não cooperadores e nem por estratégias mais generosas.”

A cooperação se tornaria um fenômeno transiente apenas mediante a presença de erros, ou nas próprias palavras de Wahl e Nowak (1999b, 334-335) “nós observamos um conjunto de estratégias cooperativas que são equilíbrios de Nash em jogos sem erros (Wahl & Nowak, 1999a). Contudo, num jogo com a presença de erros, nós encontramos que esta subfamília de cooperadores não é mais neutra com respeito a estratégias ligeiramente mais cooperativas. Vizinhos próximos desta subfamília podem invadir e o sistema evolui em direção a grande nível

de cooperação, geralmente alcançando um estado que é vulnerável a invasão de não cooperadores.”

Em resumo do que foi exposto, observa-se que a estratégia GGG de Sherratt e Roberts (2002) não é idêntica àquelas apontadas como equilíbrio de Nash por Wahl & Nowak (1999a). Além disso, a diferença entre um equilíbrio evolutivo estável ou não decorreria apenas por conta da presença ou não de erros (Wahl & Nowak, 1999a,b). Para Sherratt e Roberts (2002), uma maior estabilidade na cooperação somente seria possível numa população polimórfica de RTS, com uma pequena parcela de não cooperadores e que populações de GGG acarretariam um nível não estável da cooperação.

Portanto, a reconciliação proposta por Sherratt e Roberts (2002) contribuiu ainda mais para enfatizar as diferenças apresentadas por essas várias pesquisas acerca do dilema do prisioneiro contínuo e iterado, ao invés de colocar um ponto final.

Corroborando com Wahl e Nowak (1999a,b), Le e Boyd (2007) ao analisarem um dilema do prisioneiro contínuo e iterado mostraram também que as estratégias generosas são aquelas que obtêm as máximas recompensas possíveis quando confrontadas com elas mesmas, e que apesar desse tipo de estratégia serem estáveis nas vizinhanças do ponto de equilíbrio, as mesmas ainda continuam vulneráveis à invasão de estratégias menos cooperativas, e consequentemente à desestabilização da cooperação. Mas, ao contrário de Wahl e Nowak (1999a,b), Le e Boyd (2007) observaram que a presença de erros não influenciava este resultado. Por fim, magnitudes na variância da mutação impactavam decisivamente num estado de cooperação estável ou de colapso da cooperação.

Trabalhos de caráter qualitativo também foram aparecendo em paralelo aos modelos apresentados. Eles se pautavam em testar experimentalmente as previsões dos modelos e, principalmente, em verificar se os indivíduos faziam uso ou não de uma estratégia RTS na construção de suas relações.

Barret *et. al.* (2000) ao estudar o comportamento de catação do *Papio ursinus*, uma espécie de babuíno, verificou que os dados eram mais consistentes com uma estratégia do tipo GGG do que com uma estratégia RTS. Barret *et. al.* (2000) sugerem que limitações temporais tenham dificultado a escalada de investimento. Roberts e Renwick (2003) questionam a aplicabilidade da estratégia RTS neste cenário, já que, as observações se aproximam mais de instantâneos de relacionamentos de longo prazo do que de comportamentos relacionados ao primeiro encontro.

Bshary (2002) testou a validade da estratégia RTS em peixes limpadores do tipo *Labroides dimidiatus* quando interagem com os seus “clientes” (peixes de recife). Seus resultados mostravam que os peixes limpadores construíam um relacionamento com seus predadores através de investimentos pesados iniciais, o contrário daquilo prescrito por uma estratégia RTS. Problemas relacionados à assimetria, seja referente às recompensas ou às opções de estratégia, são sugeridas como as principais causas para a não validação da estratégia RTS.

Roberts e Renwick (2003) utilizaram um conjunto de universitários para testar se as pessoas fazem uso de uma estratégia do tipo RTS quando travam relações de cooperação. A pesquisa concluiu que os investimentos iniciais feitos pelos estudantes tendiam a ter valores intermediários, ou seja, nem tão baixos quanto como as de uma estratégia RTS e nem o valor máximo possível, conforme o modelo de Wahl e Nowak (1999a). Tendências de se aumentar os investimentos, rodada a rodada, foram observadas, aliado a uma forte propensão dos sujeitos em equiparar (*matching*) na rodada atual o investimento recebido na rodada anterior.

Sobre estes resultados, Roberts e Renwick (2003) salientam que elementos como reputação, conhecimento prévio dos estudantes de que participariam de um experimento ligado à cooperação, além das normas/padrões sociais podem ter enviesado por um favorecimento da cooperação.

Complementando o estudo anterior, Bergh e Dewitte (2006) verificaram que os participantes, estudantes de uma grande universidade europeia, ficavam menos dispostos a aumentar a cooperação quando percebiam que a probabilidade de erros aumentava.

7. OBJETIVOS PRINCIPAIS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo principal contrapor as diferenças da estratégia RTS e da família de estratégias LRS que são equilíbrio de Nash num dilema do prisioneiro contínuo e iterado na presença e ausência de ruído.

Focaremos a análise no parâmetro w , ou seja, avaliaremos principalmente como a variação deste parâmetro impacta na adoção seja de uma estratégia RTS ou de uma das estratégias LRS que são equilíbrio de Nash.

De uma forma pragmática desejamos responder as seguintes perguntas:

- Sobre o investimento inicial: qual seria a estratégia mais adequada? Atuar como uma estratégia RTS e ir “testando o terreno” ou ser generosa e investir o máximo como fazem as estratégias LRS que são equilíbrios de Nash?
- Sobre as rodadas futuras: Qual seria a melhor resposta tanto para a não cooperação como para a cooperação? Ser generoso e ir aumentando as apostas, procurar retribuir o investimento recebido ou uma outra escolha?
- Sobre o tipo de jogo: Como o tipo de jogo, simultâneo ou alternado, influenciaria no dilema do prisioneiro contínuo e iterado, assim como nos resultados das simulações?
- Sobre a presença de erros: Quais seriam os impactos gerados pela ausência ou presença de ruído?
- Seria possível conciliar as diversas conclusões dos trabalhos apresentados a respeito do dilema do prisioneiro contínuo e iterado?

Enfim, gostaríamos de determinar mediante um rol de estratégias escolhidas, qual delas se traduziria na melhor forma de jogar um dilema do prisioneiro contínuo e iterado, com e sem ruído.

8. JUSTIFICATIVA

Cooperação é um tema de grande interesse no meio científico e sobre o qual já se escreveu bastante. Desta forma, recaímos na seguinte questão: O que ainda faltaria entender sobre cooperação e a sua evolução?

Ao realizarmos a revisão da literatura percebemos que eram relativamente poucos os trabalhos que tratavam do dilema do prisioneiro contínuo e iterado, apesar da boa parte dos exemplos na natureza assemelharem-se mais a este jogo do que ao dilema do prisioneiro discreto e iterado.

Os poucos trabalhos sobre o caso contínuo estavam restritos principalmente ao final da década de 90. Parecia que com a publicação destes artigos nada mais seria necessário aprender sobre o caso contínuo.

A leitura destes poucos artigos rapidamente nos ajudaram a identificar os principais pesquisadores com os seus respectivos modelos, assim como as suas principais conclusões sobre o dilema do prisioneiro contínuo e iterado.

Um desses modelos se baseia na ideia de testar o terreno ou investir aos poucos numa relação cooperativa. Roberts e Sherratt (1998) chamaram este modelo de RTS ou *Raise-the-Stakes*.

Raise-the-Stakes ou aumentar as apostas parece ser uma estratégia comumente adotada para diversos comportamentos humanos desde investir num novo produto financeiro a numa nova relação. Não se diz, às vezes, que não se deve ir com muita sede ao pote? Desta forma, ao longo deste trabalho associamos a estratégia RTS a uma estratégia prudente.

Para testar esta estratégia, estes pesquisadores submeteram o RTS a um torneio com mais outras cinco estratégias e puderam constatar a sua superioridade mesmo diante de estratégias não cooperativas como o ALLD.

Outro trabalho importante é de Wahl e Nowak (1999a). Nele, eles propõem uma maneira de parametrizar uma gama enorme de estratégias dentro de um dilema do prisioneiro contínuo e iterado. A este conjunto de estratégias eles chamaram de LRS ou *Linear Reactive Strategies*. Um ponto importante a ser mencionado aqui é que esta parametrização não contemplava a estratégia RTS.

Diferentemente dos torneios promovidos Roberts e Sherratt (1998), Wahl e Nowak (1999a) simulam a dinâmica evolucionária para diversas estratégias da família LRS, i.e., observam a evolução de uma dada estratégia por diversas gerações submetidas às pressões seletivas e na presença de mutações.

Após testar várias estratégias, Wahl e Nowak (1999a) encontraram uma família de estratégias que tinha potencial para evoluir em direção a um equilíbrio cooperativo de Nash, i.e, recebem a máxima recompensa quando interagem entre si e são nem suscetíveis à invasão de estratégias mais generosas e nem de não cooperadores. Nesta pesquisa nos referiremos a estas estratégias que têm potencial para evoluir para um equilíbrio de Nash cooperativo como simplesmente estratégias LRS.

Contrapondo com a estratégia RTS, a estratégia LRS não testa o terreno, mas investe o máximo possível na primeira rodada do dilema, em outras palavras, mergulharia de cabeça na relação.

Além disso, a estratégia LRS é otimista, i.e., mesmo diante de uma não cooperação, sempre continuará investimento nem que seja pouco na relação. Neste ponto, a estratégia RTS é uma estratégia menos otimista, i.e., se o oponente deixa de cooperar na rodada atual, dado que houve cooperação na rodada anterior, o RTS deixará de cooperar na rodada seguinte.

A questão da estabilidade das estratégias LRS na presença de ruído foi também explorado por Wahl e Nowak (1999b).

Sherratt e Roberts (2002) tentam conciliar as diferenças entre as estratégias RTS e a LRS, na presença e ausência de ruído, mas do nosso ponto de vista, sem serem completamente bem-sucedidos.

Mesmo assim, constamos que após 2002 não foi publicado outro trabalho que pudesse conciliar de maneira satisfatória estas diferenças e é sobre esta lacuna que esta pesquisa encontra a sua justificativa.

Acreditamos que esta pesquisa traz importantes contribuições para se ter um melhor entendimento do papel da estratégia RTS e LRS no dilema do prisioneiro contínuo e iterado.

Outra questão importante não abordada nem por Wahl e Nowak ou por Roberts e Sherratt, mas que é relevante, é a possibilidade do dilema do prisioneiro contínuo e iterado ser com jogadas simultâneas. Apesar da maior parte dos exemplos da natureza ser aproximarem

mais de um jogo alternado, não podemos negligenciar o jogo simultâneo. Esta é uma outra contribuição deste trabalho.

Uma terceira contribuição é realizar uma análise de sensibilidade de como o parâmetro w impacta nas estratégias envolvidas no torneio, e conseqüentemente, no resultado das simulações. Roberts e Sherratt (1998), Wahl e Nowak (1999a) ou outros trabalhos não fizeram a análise que é proposta nesta pesquisa.

9. METODOLOGIA

De acordo com Abramo (1988), as pesquisas das ciências podem ser classificadas das seguintes maneiras:

<i>Critério</i>	<i>Tipos</i>
1. Segundo a utilização dos resultados	<p>Pesquisa pura: é a pesquisa feita para aumentar o corpo teórico da ciência ou para satisfazer a curiosidade do pesquisador, sem objetivos de utilização imediata dos resultados; é a obtenção do conhecimento pelo conhecimento.</p> <p>Pesquisa aplicada: tipo de estudo motivado pela necessidade de resolver problemas concretos, é a obtenção do conhecimento para transformação da realidade.</p>
2. Segundo a extensão do campo de estudo	<p>Levantamentos: pesquisas superficiais de uma área de grande extensão para obter dados que permitam construir quadros de referência e formular hipóteses, a serem utilizados posteriormente em pesquisas de maior profundidade.</p> <p>Pesquisa de profundidade: limitação da pesquisa a um tema específico, examinando o maior número de variáveis que interfira o no problema da pesquisa.</p>
3. Segundo o nível de interpretação	<p>Pesquisa exploratória: busca a existência de um fato, respondendo a perguntas do tipo o que é?, o que existe?</p> <p>Pesquisa descritiva: uma vez identificado o fato, descreve-se e caracteriza-se tal fato, respondendo a perguntas do tipo como é?</p>
4. Segundo os processos de estudo	<p>Estrutural: a análise sistemática da forma, do funcionamento, dos elementos e de suas inter-relações.</p> <p>Histórico: reconstituição do desenvolvimento de um fato.</p> <p>Comparativo: análise de fatos para a verificação de o que há em comum entre eles</p> <p>Funcionalista: exame das relações entre fenômenos para verificar quais variações em um acarretam variações no outro e como são estas variações.</p> <p>Estatístico: exame da frequência e da variabilidade de certos atributos.</p> <p>Monográfico: estudo em profundidade de um único fato.</p>
5. Segundo a natureza dos dados	<p>Pesquisa de dados objetivos: procura descrever objetivamente uma realidade.</p> <p>Pesquisa subjetiva: procura colher não a realidade tal como ela é, mas como se apresenta a determinado grupo de pessoas.</p>
6. Segundo o grau de generalização	<p>Censitária: dados colhidos de todos os elementos do universo de pesquisa.</p> <p>Por amostragem: dados colhidos de uma parte do todo, obedecendo a certos critérios e procedimentos estatísticos.</p>
7. Segundo a procedência dos dados	<p>Dados primários: colhidos diretamente pelo investigador.</p> <p>Dados secundários: dados já existentes, colhidos anteriormente por outro pesquisador ou instituição.</p>
8. Segundo os setores de conhecimento	<p>Monodisciplinares</p> <p>Multidisciplinares</p> <p>Interdisciplinares: pesquisa sobre assuntos que estão na fronteira de dois ou mais campos de conhecimento.</p>
9. Segundo ou as técnicas e os instrumentos de observação	<p>Observação direta</p> <p>Observação indireta</p>
10. Segundo os métodos de análise	<p>Construção de modelos</p> <p>Elaboração de tipologia e classificações</p>

Quadro 14 - Critérios utilizados para classificar as pesquisas sociais (Adaptado de Abramo, 1988)

A partir dos critérios apresentados pode-se classificar o trabalho como sendo uma pesquisa pura, pois objetiva o conhecimento pelo conhecimento sem objetivos de utilização imediata, refletida por utilizar uma modelagem matemática e ferramentas de simulação sem nenhum reflexo de dados empíricos.

Segundo a extensão do campo de estudo, a pesquisa é de profundidade, pois limita-se a examinar o maior número de variáveis que interfira na(s) estratégia(s) utilizada(s) no dilema do prisioneiro contínuo e iterado mediante as principais estratégias identificadas na revisão bibliográfica. Essa abordagem possibilitará entender melhor estes elementos e, conseqüentemente, tentar estabelecer as inter-relações existentes entre eles e a(s) estratégia(s) envolvida(s).

A pesquisa será do tipo descritiva, já que procuraremos descrever e caracterizar por meio da simulação a evolução ao longo do tempo das estratégias participantes dos torneios.

Sobre a natureza dos dados, a pesquisa é subjetiva, pois utiliza dados não da realidade tal como ela é, mas de um conjunto de pesquisas que também fazem uso da simulação. No entanto, estes dados de alguma forma se encontram vinculados à realidade.

Segundo o processo de estudo, podemos caracterizar a nossa pesquisa como estrutural e funcionalista, pois busca a forma, o funcionamento dos elementos e de suas inter-relações, e procura também por elementos de causa e efeito e a maneira como as variações em uma variável impactam na outra.

Com relação aos outros critérios restantes, podemos caracterizar esta pesquisa como sendo de observação indireta e pautada na construção de modelos matemáticos e computacionais.

Sobre os modelos matemáticos, McElreath e Boyd (2007, p. 1) afirmam que:

“são experimentos que visam a compreensão das relações causais que dirigem os fenômenos naturais importantes. Teóricos da biologia evolutiva usam uma variedade de ferramentas para estudar tais modelos, desvendando seus segredos para revelar como as interações que ocorrem durante períodos de tempo longos moldam a evolução do comportamento. Estes modelos são quase sempre muito simples para fazer previsões precisas ou mesmo representar com precisão como qualquer comportamento real evoluiu. No entanto, eles provaram ser extremamente valiosos, porque eles nos ajudam a compreender processos muito complexos para entender apenas pelo raciocínio verbal.”

Além disso, esta pesquisa visa construir um conhecimento interdisciplinar e integrado, pois permeia várias áreas do conhecimento tais como a: psicologia, teoria dos jogos, modelos matemáticos de otimização e biologia evolutiva.

Para avaliar e confrontar as estratégias LRS e RTS, simulamos torneios computacionais, nos quais essas estratégias pudessem se enfrentar e também enfrentarem as outras estratégias selecionadas num dilema do prisioneiro contínuo e iterado. O método empregado é semelhante àquele usado por Axelrod (2006), Roberts e Sherratt (1998). Nowak e Sigmund (1992), Nowak e Sigmund (1993).

Acreditamos que a simulação de torneios em conjunto com a construção de diversos cenários para os parâmetros escolhidos poderá prover de elementos para atingir os objetivos elencados.

10. A SIMULAÇÃO COMO MÉTODO CIENTÍFICO

Mediante tudo que foi exposto no capítulo anterior pode-se questionar sobre a adequação da metodologia escolhida para conduzir a pesquisa e da sua validade como um possível método científico. É importante discutirmos estes pontos, já que a simulação possui pouca tradição e familiaridade dentro da psicologia, e mesmo aqueles já familiarizados, questionariam se é possível produzir conhecimento científico com a simulação (Perk, 2004; Grüne-Yanoff & Weirich, 2010).

Este capítulo tem como objetivo responder as duas questões anteriores: justificar a escolha do método e apresentar os principais argumentos que elevam a simulação a uma terceira via para fazer ciência.

Sabe-se que boa parte das pesquisas surge da necessidade de entender um problema do mundo real, como resultado, o cientista muitas vezes vê-se obrigado a construir um modelo que nada mais é do que uma representação intencional de algum sistema real (Starfield et al., 1990). O desafio nestes casos, contudo, é mostrar que os modelos são realistas o suficiente para atender a sua finalidade (Rykiel, 1996).

Assim, podemos dizer que um modelo é uma simplificação de um sistema mais complexo, tem como ponto de partida o modelo conceitual do cientista, composto por componentes, variáveis de estado, processos e interações, e que reunidos fornecem uma descrição simplificada do fenômeno representado (O'Sullivan & Perry, 2013).

Mas, como avaliar se a visão, traduzida pelo modelo, que o cientista imprimiu a realidade de fato a explica ou permite predizer algo sobre o fenômeno analisado?

Neste ponto torna-se necessário a validação do modelo. Validar não implica que o modelo seja 'verdadeiro', embora o termo validação embute um forte senso de legitimidade, conforme Oreskes et al. (1994) e Rykiel (1996).

Além disso, o ato de validar pode gerar diferenças semânticas e abordagens metodológicas diferentes nas visões filosóficas de como a ciência é feita (Augusiak et al., 2014). Mas então o que significa validar?

Partidários do positivismo, ideia que dominou o mundo entre a metade do século 19 até a metade do século 20, propõem que hipóteses e/ou teorias sejam testadas em experimentos que são projetados para confirmá-las ou refutá-las (Barlas&Carpenter, 1990). Do ponto de vista desta linha filosófica, validação estaria relacionado a uma ideia do modelo ser falso ou verdadeiro na sua forma de representar a realidade.

Críticos do positivismo, entre eles Karl Popper, argumentam que as teorias podem apenas ser refutadas e nunca verificadas (Popper, 1959). Com Popper, o critério da falseabilidade vem se contrapor ao critério da verificabilidade. Consequentemente, um único caso já seria suficiente para rejeitar uma hipótese e teoria. Por exemplo, um único cisne negro já seria suficiente para falsear a teoria de que todos os cisnes são brancos (Taleb, 2008).

Deste ponto de vista, validação se torna um processo menos formal já que um modelo válido é uma das diversas representações possíveis da realidade. Neste caso, validar estaria relacionado a perguntar-se o quanto suficientemente o modelo é verdadeiro em face das evidências acumuladas frente ao propósito do modelo (Augusiak et al., 2014).

Para Holling (1978) como os modelos estão relacionados a hipóteses complexas, a sua validação seria impossível de se alcançar e que apenas o falseamento seria possível. Desta forma, seria inapropriado relacionar a ideia de validação aos modelos.

Neste ponto pode-se indagar: Como podemos verificar ou falsear um modelo? Isso pode ser feito, por exemplo, por um desses métodos científicos: indução, dedução ou simulação.

De acordo com Axelrod (1997, p. 3 - 4):

“Indução é a descoberta de padrões em dados empíricos... Dedução, por outro lado, envolve especificar um conjunto de axiomas e obter conclusões a partir dessas suposições... Modelagem baseada em agente (simulação) é uma terceira forma de fazer ciência. Da mesma forma que a dedução, ela começa com um conjunto de suposições explícitas. Mas ao contrário da dedução, ela não prova teoremas. Em vez disso, um modelo baseado em agente gera dados simulados que pode ser analisado indutivamente. Ao contrário da indução típica, contudo, os dados simulados vêm de um conjunto de regras rigorosamente especificadas ao invés de uma medição direta do mundo real. Consequentemente, o propósito da indução é encontrar padrões em dados e da dedução a de encontrar consequências a partir das suposições, o propósito da modelagem baseada em agente é ajudar a intuição.”

A simulação computacional pode ser considerada um método relativamente recente de fazer ciência ao ser comparado com a indução e com a dedução. Os primeiros usos iniciaram-se na década de 60, sendo largamente utilizada na década de 90 (Gilbert & Troitzsch, 2005).

A sua popularização se deu por três motivos: o barateamento e desenvolvimento dos computadores, a dificuldade da ciência experimental em explorar alguns campos de investigação e a constatação de que muitos sistemas são do tipo não-lineares (O’Sullivan & Perry, 2013). A principal vantagem da simulação é que a partir do momento em que temos uma boa representação do sistema, o mesmo se torna fortemente manipulável, possibilitando experimentações que poderiam ser impossíveis, seja por serem muito custosas, por demandar muito tempo ou por serem antiéticas nos sistemas reais (Perk, 2004).

Mas o que é simulação?

Simular é imitar ou replicar (Grüne-Yanoff & Weirich, 2010). Para Stephan Hartmann (1996, p. 83) “a simulação imita um processo através de outro, onde o processo pode se referir a um objeto ou um sistema cujo estado se altera com o tempo”. Winsberg (2003) caracteriza a simulação a partir de três pontos de vista: (i) usado para resolver equações analíticas computacionalmente; (ii) é uma nova ciência e (iii) é usado para capturar e imitar sistemas do mundo real.

Modelos de simulação podem ser considerados um novo tipo de sistema experimental, ocasionando o termo “experimentos numéricos” (Winsberg, 2003; Grüne-Yanoff & Weirich, 2010). Outros autores se referem a esta abordagem como ciência *in silico* (O’Sullivan & Perry, 2013).

Pode-se aplicar este método para diversos tipos de problemas onde para cada situação, existem modelos próprios. Desta forma, tem-se: os modelos para tratar do problema de fila, modelos de sistemas dinâmicos, dentre outros. Uma visão geral e detalhada dos principais modelos no âmbito da simulação é apresentada por Gilbert & Troitzsch (2005).

Neste trabalho foi usada a modelagem baseada em agente ou *Agent-Based Modeling* (ABM).

ABMs são modelos nos quais organismos ou agentes são criados para serem únicos ou com características que os diferenciam. Além disso, são entidades autônomas que irão interagir uns com os outros num ambiente virtual. Estes agentes podem ter suas propriedades/características alteradas ao longo do tempo, também podem ter ciclos de vida diferentes e tomam decisões autônomas em busca dos seus objetivos.

Alguns autores fazem uso também do termo *Individual-Based Modeling* (IBM). Isto é mais comum em disciplinas fora da ecologia. Historicamente, as diferenças entre IBM e ABM, residem no fato que os primeiros são focados na variabilidade individual e nas interações locais, enquanto que o ABM foca na tomada de decisão e no comportamento adaptativo. Observa-se que estas diferenças estão desaparecendo, fazendo com que alguns autores usem os dois nomes como sinônimos (Railsback & Grimm, 2012). Neste trabalho também não faremos distinção entre os dois.

Assim, de acordo com Axelrod (1997, p. 3), situações nas quais “o estudo de um grande número de atores com alterações nos padrões de interação geralmente torna muito difícil uma solução matemática, uma ferramenta de pesquisa primária para este caso é a simulação computacional.”

Mais especificamente, ela seria necessária quando num modelo os agentes fazem uso de estratégias adaptativas ao invés de estratégias de otimização. Quando isso ocorre, a simulação é geralmente a única forma viável para estudar populações de agentes que se comportam adaptativamente ao invés de serem completamente racionais (Axelrod, 1997). Eles ajustariam seus comportamentos tomando como parâmetro o seu próprio comportamento, dos outros agentes e do seu ambiente (Railsback & Grimm, 2012).

Nesta situação, ela ajudaria a entender a relação entre os atributos e comportamentos dos indivíduos (o nível micro) e as propriedades globais dos grupos sociais (nível macro), (Gilbert & Troitzsch, 2005), que em certas situações seria impossível de deduzir o resultado que emergiria da agregação de todas estas estratégias.

Assim, o objetivo principal da simulação não é representar a realidade nos seus mínimos detalhes, mas é de realizar uma exploração de uma forma bem geral para que diversos aspectos do problema possam ser iluminados (Axelrod, 1997).

Segundo Bowles (2004, p. 17), “simulações não produzem teoremas ou proposições que são geralmente verdade, mas sim, como experimentos, eles produzem uma riqueza de dados que podem apontar para conclusões inequívocas, mas muitas vezes não o fazem.”

Isso não torna as simulações do tipo ABM menos científicas, pois, segundo Ormerod e Rosewell (2009, p. 137), “ela (ABM) é uma metodologia muito mais científica do que a econometria, muito do qual é um mero ajustamento de curvas não modelando no real sentido da palavra.”

É importante salientar que a simulação não é uma abordagem de fácil aplicação, conforme enfatizado por O’Sullivan & Perry (2013). Um ponto crítico é o problema da *equifinalidade*, que se baseia na ideia da existência de um grande número de modelos que mediante diferentes entradas poderia produzir um comportamento consistente com os dados observado. Sobre isso Winsberg (2003, p. 109) nos diz:

“Fazer a simulação funcionar, e fazer com que ela produza resultados que o pesquisador esteja disposto a sancionar como confiáveis, é uma habilidade que tem que ser desenvolvida num período longo de tentativa, erro e comparando-se os resultados obtidos tanto com a teoria como com os resultados conhecidos dos experimentos físicos. Em resumo, quando nos referimos a semiautonomia de um modelo de simulação, estamos dizendo que ela começa a partir da teoria, mas o modificamos com extensivas aproximações, idealizações, falsificações, informações auxiliares, sangue, suor e lágrimas de muita tentativa e erro.”

Assim, na visão de Grüne-Yanoff & Weirich (2010), em vez de fornecer explicações completas ou parciais de dados, a simulação só pode fornecer explicações possíveis, que por

sua vez, podem ajudar na construção de explicações reais. Neste sentido, vale a pena narrar rapidamente o papel da simulação envolvendo a tentativa da prova da conjectura de Kepler.

Em 1611, Johannes Kepler conjecturou que a forma mais compacta de empilhar esferas de mesmo raio seria por meio de um empilhamento conhecido como “cúbico de face centrada” (CFC). Porém, o próprio Kepler não foi capaz de provar esta afirmação. Em 1998, Thomas Hales ofereceu um programa de cinco etapas, envolvendo extensa computação/simulação, resultando numa prova. O artigo de Hales foi publicado com uma nota de advertência que explicava que embora uma equipe de avaliadores tenha sinalizado que “99%” da prova estivesse correta, eles não foram capazes de verificar todos os detalhes (da simulação) (Kepler Conjecture, 2015).

Outro aspecto problemático com a simulação é que, segundo Railsback & Grimm (2012, p. 36), “muitas descrições de ABMs na literatura científica são incompletas tornando impossível reimplementá-las ou replicar os resultados apresentados”. Como a replicação é a chave para a ciência, conseqüentemente modelos que não podem ser replicados não podem ser refutados e, portanto, não são científicos.

A visão de que os modelos de simulação são semelhantes a caixas-pretas, i.e., que esta falta de transparência e clareza seja talvez um dos principais motivos que transforme a simulação em um método tão questionado em comparação com os demais.

Padronizar uma simulação a tornaria científica, já que haveria melhoria na comunicação dos modelos e dos resultados, que por sinal, favoreceria a replicação, assim como na construção de novos conhecimentos.

Um ABM baseado num protocolo padronizado sempre teria a mesma estrutura, semelhante ao que se vê em artigos científicos, independente das particularidades do modelo (Railsback & Grimm, 2012). Com isso também facilitaria aos leitores encontrarem rapidamente as informações necessárias ou desejadas.

Atender aos anseios do leitor seria crucial para aceitação do novo padrão (Schmolke et al., 2010). Além disso, os leitores fazem as mais importantes interpretações sobre o conteúdo de um texto baseado nas pistas que eles recebem da estrutura na qual este texto se encontra organizado (Gopen & Swan, 1990).

Tomemos como exemplo a estrutura padrão dos artigos científicos que se inicia com o título, seguido respectivamente pelo resumo, introdução, materiais e métodos, resultados, discussão e conclusão. Um artigo fora deste padrão geraria confusão para o leitor.

A informação é interpretada mais facilmente e mais uniformemente se forem dispostas em locais onde a maioria dos leitores já espera por encontrá-las (Gopen e Swan, 1990).

A busca por algo que pudesse comunicar ao leitor os modelos ABM apresentados neste trabalho, e que paralelamente, pudesse validá-los como métodos científicos, nos conduziu para a área de Ecologia, onde encontramos uma grande quantidade de artigos e livros discutindo sobre a questão epistemológica da simulação.

Parece nos coerente que em face do tipo de problemas com a qual esta área deve lidar periodicamente e a limitação que outros métodos científicos devem apresentar frente a estes problemas, a simulação acabe sendo a principal metodologia utilizada, e conseqüentemente, discussões sobre a validade do método, assim, como maneiras de torná-lo mais científicos sejam naturais em face disso.

Foi também na Ecologia que localizamos um dos poucos ou os únicos instrumentos padronizados utilizados para documentar simulações do tipo ABM a saber: a documentação TRACE (*Transparent and Comprehensive Ecological modeling*) (Schmolke et al., 2010), focado principalmente no processo de modelagem e o protocolo ODD (abreviação para *Overview, Design concepts, and Details*) (Grimm et al., 2006) que se propõe a documentar e detalhar o modelo de simulação.

Enfatizamos que tanto a documentação TRACE quanto o protocolo ODD se originaram de uma preocupação no aspecto epistemológico do método ABM e IBM, i.e., favorecer a replicabilidade dos modelos e conseqüentemente a validação do conhecimento produzido por eles.

É importante também salientar que apesar da origem da documentação TRACE e do protocolo ODD serem da Ecologia, pode ser verificado que ambos possuem estruturas/formatos bem genéricas podendo assim abarcar outros modelos de simulação do tipo ABM, como aqueles apresentados neste trabalho. Um detalhamento maior do TRACE e do ODD é dado na seqüência.

11. A DOCUMENTAÇÃO TRACE E O PROTOCOLO ODD

11.1 Protocolo ODD

As simulações ABM surgiram juntamente com fortes críticas pela sua documentação deficiente impedindo uma avaliação do modelo subjacente (Lorek & Sonnenschein, 1999; Grimm et al., 2010).

Estas críticas motivaram um grupo de pesquisadores oriundos de diversas áreas do conhecimento a criarem em 2006 um protocolo com um formato genérico e estrutura padronizada pelo qual os modelos ABM e IBM poderiam ser documentados. Este protocolo foi chamado de ODD, acrônimo de *Overview, Design concepts, Details*.

O protocolo ODD, de acordo com Grimm et al. (2006, p.124), “é concebido como uma ferramenta para facilitar a comunicação e a replicação de modelos baseados em agentes (ABM) e baseados em indivíduos (IBM)”. Segundo Grimm et al. (2010, p. 2766), “o protocolo ODD representa uma forma lógica e natural de compor um modelo.” Ainda, segundo Grimm et al. (2010, p.2760), “tudo isso faria com que a replicação dos ABMS fosse mais fácil e assim menos sujeitas a críticas de serem irreprodutíveis.”

Outros benefícios observados com o uso do protocolo ODD são: a descrição do modelo torna-se fácil/intuitivo com o protocolo e é padronizada e completa, pois o protocolo não deixa que se esqueça de nenhum detalhe importante do modelo. Além disso, a descrição do modelo torna-se fácil para o público não familiarizado com o mesmo. Por fim, o protocolo mostrou-se também útil com modelos de simulação diferentes das do tipo ABM e IBM (Grimm et al., 2006).

As informações de um modelo utilizando o protocolo ODD são sempre estruturadas numa mesma sequência. O protocolo apresenta as informações do modelo em três seções. Inicialmente apresenta-se uma visão geral (*Overview*) do modelo com informações sobre o seu propósito, suas entidades ou agentes, as variáveis de estado, escala temporal, caracterização do cenário e dos processos envolvidos na simulação, seguida pela seção atributos do projeto (*Design concepts*), no qual é descrito as características essenciais do modelo. Por fim, a terceira seção fornece um detalhamento (*Details*) dos processos e de qualquer outro elemento que seja necessário para a compreensão/descrição completa do modelo.

Na tabela 8 é apresentada a estrutura do protocolo ODD com as suas três seções e com os seus respectivos elementos constituintes. Uma breve descrição também é apresentada para cada elemento. A estrutura apresentada abaixo é uma versão atualizada publicada em Grim et al. (2010) do protocolo original de Grimm et al. (2006).

	<i>Elementos do Protocolo ODD</i>	<i>Este elemento do protocolo ODD fornece informação de suporte sobre:</i>
Visão Geral	1. Propósito	O porquê da construção do modelo e dos seus objetivos gerais e específicos.
	2. Entidades, variáveis de estado e escalas	Descrição dos tipos de agentes e das variáveis de estado que caracterizariam estes agentes (ex.: idade, aptidão, localização etc.), o ambiente biótico e abiótico, a resolução espacial e temporal do modelo.
	3. Visão geral dos processos e sequenciamento/ordem na qual eles ocorrem	Os processos a nível ambiental e individual que existem no modelo. (e.g.: reprodução, seleção, forrageamento, mortalidade etc.) e a sua ordem de ocorrência.
Atributos do modelo	4. Atributos do projeto	<ul style="list-style-type: none"> • Princípios Básicos; • Emergência; • Adaptação; • Objetivos; • Aprendizagem; • Predição; • Percepção; • Interação; • Estocasticidade; • Coletividade; • Observação.
Detalhes	5. Inicialização	Como é o ambiente e os indivíduos criados no início de cada simulação, i.e., quais são os valores iniciais das suas variáveis de estado? Estes valores são escolhidos arbitrariamente ou são provenientes de alguma fonte?
	6. Dados de Entrada	Refere-se às condições do ambiente que podem se alterar no espaço e no tempo. Ao contrário da inicialização, se traduz na imposição de um aspecto dinâmico a certas variáveis de estado. (ex.: precipitação que difere ao longo dos meses e das regiões, comportamento das marés etc.).
	7. Submodelos	Nesta seção são explicados em detalhes todos os submodelos usados na operacionalização dos processos descritos na seção “3 - Visão geral dos processos e sequenciamento/ordem na qual eles ocorrem”.

Tabela 8 – Uma visão geral do protocolo ODD para descrever ABMs (Extraído de Railsback & Grimm, 2012)

A tabela 9 complementa a tabela 8. Nela detalhamos e descrevemos cada elemento que compõem a seção “4 -Atributos do projeto” num protocolo ODD.

<i>Elementos relacionados aos atributos do modelo no protocolo ODD</i>	<i>Algumas questões chaves</i>
Princípios Básicos	Quais são os conceitos gerais, teorias, hipóteses subjacentes ao <i>design</i> do modelo? Como está o modelo relacionado com a teoria ou pensamento prévio sobre o qual o problema foi baseado? Como foi incorporado estes princípios no <i>design</i> do modelo? Como o modelo implementou estes princípios no seu <i>design</i> ?
Emergência	Quais são os resultados e saídas mais importantes do modelo? Quais deles emergem a partir do comportamento adaptativo dos indivíduos, e quais são imposições de tal forma que o modelo produza certos resultados?
Adaptação	Quais são os comportamentos adaptativos que os agentes têm? De que maneira eles respondem a mudanças no ambiente? Quais são as decisões que eles tomam? Como são modelados estes comportamentos?
Objetivos (função objetivo)	No caso de modelos em que os agentes possam escolher entre alternativas que provavelmente possam aumentar algum objetivo específico, qual é a medida ou a função objetivo utilizada pelo agente para avaliar as alternativas (exemplo, aptidão na ecologia, utilidade na economia)? Como a função objetivo representa os processos que relacionam os comportamentos adaptativos às importantes variáveis dos agentes e ao seu ambiente? Como o estado interno do agente influencia na modelagem de suas decisões? A função objetivo se altera quando ocorre alteração no agente?
Aprendizagem	Os indivíduos alteram os seus traços adaptativos ao longo do tempo como consequência das suas experiências? Se sim, como?
Predição	Como os agentes predizem as condições futuras (ambiental e interna) nos seus traços adaptativos? Quais são as suposições ou mecanismos, relacionados aos organismos reais, que foram usadas para isso? Como esta predição simulada faz uso dos mecanismos como memória, aprendizagem, ou pistas do ambiente? Ou a predição é “tácita”: apenas implícita nos traços adaptativos?
Percepção	Quais são as variáveis, do ambiente ou de outro agente, que podem ser “percebidas” pelo organismo? E como isto é considerado no seu comportamento? Como os mecanismos de percepção foram modelados? Quais são as variáveis em que se assume que simplesmente o agente “conhece”? Com que acurácia ou incerteza estes agentes “conhecem” ou percebem estas variáveis?
Interação	Como os agentes interagem? Com quais outros agentes ele interage? Eles interagem diretamente? Qual é o mecanismo real na qual estas interações se baseiam? Qual é a escala temporal e espacial em que isso ocorre?
Estocasticidade	Como são os processos estocásticos usados no modelo e por quê? Modelos estocásticos são usados para inicializar o modelo?
Coletividade	Os organismos são agrupados em algum tipo de grupo ou clusters? Se sim, como estes grupos são representados? Os grupos são modelados como outro tipo de agente com seus próprios traços e variáveis de estado?
Observação	Quais são as saídas geradas pelo modelo que permite observar a sua dinâmica interna assim como seu comportamento a nível de sistema? Quais são as ferramentas necessárias para obter estas saídas? Quais são as saídas necessárias para testar o modelo e resolver o problema para o qual ele foi construído?

Tabela 9 - – Detalhamento dos elementos relacionados aos conceitos do projeto (Adaptado de Railsback & Grimm, 2012, p. 41)

A seção atributos de um modelo no protocolo ODD, tabela 9, constitui num tipo de *checklist* para garantir que decisões importantes pertinentes a construção do modelo tenham sido feitas de maneira consciente e que os leitores estejam a par destas decisões (Railsback,

2001; Grimm & Railsback, 2005). É possível que nem todos estes atributos possam estar presentes num dado modelo. Desta forma, recomenda-se que os atributos não utilizados possam ser omitidos na descrição do protocolo ODD.

Desde a sua criação em 2006, o protocolo ODD vem ganhando cada vez mais aceitação na Ecologia e nas ciências sociais (Polhill et al., 2008).

De acordo com Grimm et al. (2010), em 14 de dezembro de 2009, o *Web of Science* listou 87 citações a Grimm et al. (2006), destas, 54 faziam uso do protocolo ODD. Ainda segundo Grimm et al. (2010), em 13 das 87 publicações, um ou mais dos 28 autores de Grimm et al. (2006) eram coautores; a maioria das publicações provinham da ecologia (70% ou 38 publicações); outras disciplinas incluíram ciências comportamentais (seis publicações); epidemiologia, ciência florestal, ciências sociais (com duas publicações cada), e arqueologia, microbiologia, biomedicina e oceanografia (com uma publicação cada). Seis meses após este levantamento inicial (26 de julho de 2010), o número de citações do artigo originador do protocolo ODD saltou de 87 para 123 de acordo com Grimm et al. (2010).

Esses números servem para corroborar a importância deste protocolo para a comunidade científica e mostrar a versatilidade e aplicabilidade deste instrumento para uma gama de modelos do tipo ABM e IBM provenientes das diversas áreas científicas.

Assim existe uma boa chance de que o protocolo ODD possa se estabelecer completamente no futuro como padrão para descrever modelos do tipo ABM ou outros modelos mais complexos (Grimm et al., 2010).

11.2 A Documentação TRACE

Schmolke et al. (2010) salientam que para sermos capazes de julgar a utilidade de um modelo deve haver: transparência no processo de modelagem, testes e análises abrangentes do modelo. A falta ou insuficiência de informações sobre o processo de construção do modelo torna impossível que se tenha confiança sobre o seu uso na tomada de decisões.

Infelizmente não existe uma cultura difundida e estabelecida de documentar o propósito, a construção e os testes realizados em modelos do tipo ABM e IBM (Pilkey & Pilkey-Jarvis, 2007). Sem isso pode acontecer dos modelos serem construídos sem padrões de qualidade assegurada e embora ele possa ter sido bem projetado, construído e testado, pouco crédito lhe será dado pelos usuários.

O reconhecimento da necessidade de se estabelecerem as boas práticas na construção de modelos ABM e IBM levaram a Schmolke et al. (2010) a propor o uso de uma documentação com formato e terminologia padrão que pudesse descrever e detalhar de uma forma abrangente

o processo de modelagem, i.e., o desenvolvimento, a descrição, testes, análises e aplicação do modelo.

Essa documentação recebeu o nome de TRACE que é o acrônimo de *TR*ansparent and *C*omprehensive *E*cological modelling documentation.

A documentação TRACE nasceu da pesquisa feita pelos autores sobre as terminologias e as boas práticas que já vinham sendo utilizadas no processo de modelagem.

O que Schmolke et al. (2010) observaram é que boa parte dos elementos que conduziam a uma boa prática no exercício de modelagem era algo relativamente conhecida, mas que ainda não tinha sido estabelecida ou formalizada por ninguém como algo padrão.

Por exemplo, na revisão da literatura que eles fizeram identificou-se em 41 publicações de várias áreas de aplicações, 13 questões convergentes relacionadas ao processo de modelagem.

Ainda, segundo Schmolke et al. (2010), a falta de um total envolvimento dos outros interessados no processo de modelagem (tomadores de decisão e usuários), a ausência de incentivos para a padronização e o problema de uma terminologia coerente impediram até então o estabelecimento de um padrão no processo de modelagem de simulações do tipo ABM e IBM.

Portanto, faltava então organizar este processo, i.e., criar um padrão com base neste conjunto de boas práticas e terminologias já largamente utilizadas, algo que a documentação TRACE veio a fazer.

O propósito da documentação TRACE é prover evidências convincentes de que o modelo foi cuidadosamente pensado, corretamente implementado e testado, bem entendido e apropriadamente utilizado para o objetivo a qual ele foi criado (Grimm et al., 2014). Outro propósito é assegurar que todos os elementos importantes do processo de modelagem tenham sido exaustivamente abordados num documento bem estruturado (Schmolke et al., 2010).

As duas principais ideias subjacentes na concepção do TRACE são: (i) usar uma terminologia que abrangesse todo o processo ou ciclo de modelagem; (ii) padronizar esta terminologia e a estrutura deste documento, de tal forma que os usuários do modelo pudessem saber localizar uma dada informação referente ao processo ou ao modelo.

Os elementos da documentação TRACE podem ser agrupados em três grandes grupos: desenvolvimento, análise e aplicação. Propositamente esses grupos que compõe a estrutura da documentação TRACE também são as etapas do ciclo da modelagem, conforme figura 10.

Ainda nesta figura, observa-se a estrutura, assim como os elementos constituintes de cada grupo na documentação TRACE proposta por Schmolke et al. (2010).

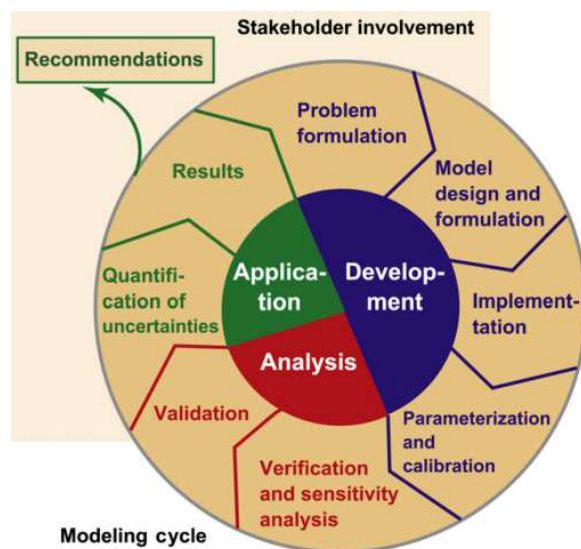


Figura 10 – Etapas do ciclo de modelagem no contexto da documentação TRACE (extraído de Schmolke et al., 2010, p. 483)

Vale a pena salientar que enquanto o protocolo ODD documenta o modelo, a documentação TRACE, foca no processo de modelagem. Em modelos ABMs e IBMs, o protocolo ODD estaria contido na documentação TRACE, na seção descrição do modelo.

Outro ponto a esclarecer é distinguir a diferença de dois termos que aparecem no ciclo de modelagem: verificação e validação.

Pilch et al. (2000) e McNamara et al. (2007) relacionam o processo de verificação a de determinar a correta implementação dos modelos do processo no software computacional, i.e., se o software realiza corretamente tudo aquilo que é solicitado pelo modelo. Já para os mesmos autores validação refere-se ao processo de avaliar em que grau o modelo computacional é uma adequada representação do mundo real, i.e., o seu poder explicativo e/ou preditivo.

Augusiak et al. (2014) propõem um novo conceito juntamente com uma nova terminologia para descrever o processo de avaliação e validação de modelos ABM, especificamente, eles propõem a junção das ideias (e das palavras) avaliação (*evaluation*) e validação (*validation*) num novo termo denominado de avaliação ou (*evaludation*). A palavra avaliação não existe na nossa língua. Criamos esta palavra da mesma forma que Augusiak et al. (2014) como uma possível tradução da palavra e do conceito de *evaludation*.

Augusiak et al. (2014, p.121) definem avaliação como “processo de assegurar a qualidade e credibilidade ao longo de todos os estágios do processo de modelagem, análise e aplicação do modelo.” Desta forma, podemos dizer que a avaliação de um processo significa avaliá-lo e validá-lo simultaneamente; avaliar garante a sua qualidade e validá-lo, a sua credibilidade; num processo de modelagem essa nova ideia e termo sugerido por Augusiak et

al. (2014) parece-nos bastante apropriado já que as atividades de validar e avaliar são geralmente feitas em concomitância.

A avaliação de um modelo, conforme (Augusiak et al., 2014), envolve seis etapas: (i) ‘avaliação dos dados’ que envolve o exame minucioso dos dados utilizados para construir e testar o modelo; (ii) ‘avaliação do modelo conceitual’ que está ligado a examinar as hipóteses simplificadoras subjacentes a construção do modelo; (iii) ‘implementação da verificação’ se refere a testar as implementações do modelo seja por meio de equações ou por meio de um programa de computador; (iv) ‘verificação das saídas do programa’ pela comparação destas informações com aquelas que foram usadas para construir o modelo e para calibrá-lo; (v) ‘análise do modelo’ no que tange a sua sensibilidade a alterações nos parâmetros e formulações dos processos; e (vi) “corroboração das saídas do modelo” ao comparar as saídas geradas pelo modelo com novos dados e padrões, os quais não foram utilizados nem na sua construção e nem na sua calibração.

Assim, enquanto a documentação TRACE de um modelo se preocupa principalmente em documentar de uma forma padronizada o seu ciclo de modelagem, a avaliação foca em padronizar uma terminologia, pois consiste em diversos elementos, ou passos, que servem como elementos estruturantes para um sistema sugerido de terminologia (Augusiak et al., 2014).

Percebendo a complementaridade destas duas ideias, Grimm et al. (2014) propõem unir a ideia e as terminologias de avaliação ao da documentação TRACE. Isso aumentaria o escopo da documentação TRACE que passaria a ser, não mais uma documentação, mas uma ferramenta de planejamento, documentação e avaliação do modelo. Neste novo cenário, Grimm et al. (2014) propõem que TRACE passaria a ser acrônimo de *TRANSPARENT and Comprehensive model Evaluation*.

Na figura 11 apresentamos a terminologia e estrutura original da documentação TRACE de Schmolke et al. (2010) e as etapas que compreenderia o processo de avaliação sugeridos por Augusiak et al. (2014). Perceba que a ferramenta TRACE de Grimm et al. (2014) integram as ideias de Schmolke et al. (2010) e de Augusiak et al. (2014) numa ferramenta mais completa e abrangente.

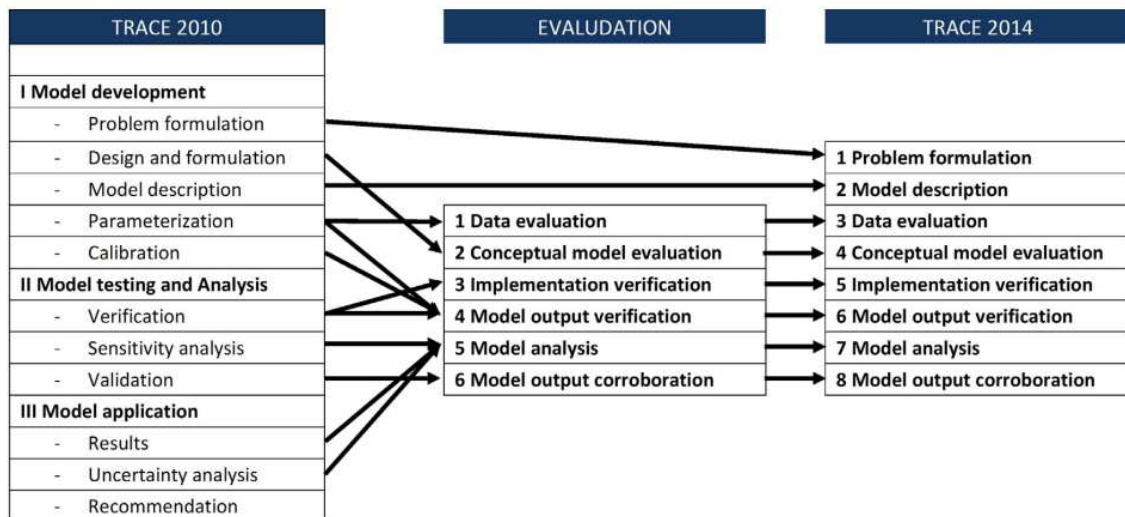


Figura 11 – Estrutura e terminologia do formato TRACE original, o processo de avaliação de um modelo e nova estrutura e terminologia proposta (extraído de Grimm et al. 2014, p. 136).

Na tabela 10 é apresentada a estrutura atual da ferramenta TRACE com os seus elementos que é a versão atualizada publicada em Grimm et al. (2014) da proposta original de Schmolke et al. (2010). Uma breve descrição também é apresentada para cada elemento.

<i>Elementos da documentação TRACE</i>	<i>Este elemento da documentação TRACE fornece informação de suporte sobre:</i>
1. Formulação do problema	O contexto na qual o modelo será usado; os clientes ou os interessados para os quais ele é endereçado; uma precisa especificação da(s) questão(ões) que deveriam ser respondidas pelo modelo, incluindo se necessário as saídas do modelo juntamente com o domínio de aplicabilidade do mesmo, incluindo também, em que grau extrapolações seriam aceitáveis.
2. Descrição do modelo	Descrição detalhada do modelo. Para simulações do tipo ABM e IBM ou mesmo outros, o protocolo ODD é recomendado como formato padrão. Para submodelos complexos, incluir uma explicação concisa da lógica subjacente aos mesmos. Os usuários do modelo deveriam aprender sobre o que é o modelo, como ele funciona e o que guiou a sua construção (<i>design</i>).
3. Avaliação dos dados	A qualidade e fonte dos dados numéricos e qualitativos usados para a parametrização do modelo, tanto via calibração direta quanto indireta, e dos padrões observados que foram usados para projetar a estrutura geral do modelo. Esta avaliação crítica permitirá que os usuários do modelo avaliem o escopo e as imprecisões dos dados e do conhecimento utilizado no modelo.
4. Avaliação do modelo conceitual	As suposições simplificadoras subjacentes ao modelo, tanto com relação ao conhecimento empírico e geral. Esta avaliação crítica permitirá que os usuários entendam que a construção do modelo não foi um processo <i>ad hoc</i> mas baseado em considerações cuidadosamente escrutinizadas.
5. Verificação da implementação	(1) Se o código de computador do o modelo foi testado a fundo a procura de erros de programação, (2) se a performance do modelo implementa o mesmo da sua descrição, e (3) como o software foi projetado e documentado para prover as ferramentas úteis e necessárias (interfaces, automação de experimentos, etc.) e para facilitar futura instalação, modificação e manutenção.
6. Verificação dos resultados do modelo	(1) Quão bem as saídas do modelo se adequam às observações e (2) quanto da calibração e dos efeitos dos drivers ambientais estão envolvidos na obtenção do bom ajustamento das saídas do modelo aos dados.
7. Análise do modelo	(1) Quão sensível as saídas do modelo são às mudanças dos seus parâmetros (análise de sensibilidade), e (2) quão bem a emergência das saídas do modelo foi compreendida.
8. Validação ou Corroboração das saídas do modelo	Como as predições do modelo podem ser comparadas com os dados independentes e padrões que não foram utilizados, e preferivelmente não conhecidos, enquanto o modelo foi desenvolvido, parametrizado e verificado. Ao documentar a corroboração das saídas do modelo, os usuários terão evidências, em adição a verificação das saídas, que o modelo é estruturalmente realista de tal forma a confiar em suas predições em certo grau.

Tabela 10 – Estrutura, terminologia e conteúdo atualizado dos documentos do TRACE (adaptado de Grimm et al., 2014, p. 132)

Em contraste ao protocolo ODD, o qual foi largamente utilizado e aceito como padrão na ecologia e em outras áreas, conforme apresentado anteriormente. Grimm et al. (2014) observam que nenhum uso independente da documentação TRACE foi publicado desde Schmolke et al. (2010) e sugerem que talvez esta ferramenta não esteja pronta para o uso.

É possível que após as atualizações da documentação TRACE sugeridas por Grimm et al. (2014), a mesma possa finalmente ser mais aceita e usada semelhantemente ao protocolo ODD.

12. O PAPEL DO INVESTIMENTO INICIAL NA EVOLUÇÃO DO COMPORTAMENTO COOPERATIVO – UM EXEMPLO SIMPLES

O modelo proposto a seguir serve para ilustrar, de uma forma simples, como o investimento inicial do agente poderia afetar a evolução do comportamento cooperativo no dilema do prisioneiro contínuo iterado.

12.1 Resumo

Um dos mecanismos que possibilita a evolução da cooperação é a reciprocidade direta, pela qual uma mesma díade interage repetidas vezes num dilema do prisioneiro. Tomando como base o jogo anteriormente mencionado e introduzindo estratégias *Tit-for-Tat* (TFT) mais prudentes, i.e., com menos investimento inicial de *fitness* num cenário de maior incerteza de haver cooperação. Mostramos por meio de um modelo matemático baseado na teoria dos jogos evolucionária que os mecanismos de seleção natural favorecem a família de estratégias TFT prudentes. Os resultados obtidos indicam que a prudência no momento de iniciar o processo de cooperação catalisa a sua evolução estável. Como consequência, estratégias menos prudentes são mais suscetíveis às invasões de estratégias não cooperativas.

12.2 Modelo Proposto

Vamos admitir uma classe de estratégias denominada de TFT Gradual. A principal ideia desta estratégia está em cooperar gradualmente com o seu oponente. Caso o oponente deixe de cooperar num dado momento, isto acarretará a não cooperação da estratégia nas próximas rodadas. Para que a estratégia TFT Gradual volte a cooperar, será necessário ganhar novamente a “confiança” dela, i.e., será necessário que o oponente volte a cooperar e que ele vá conquistando aos poucos a cooperação total de TFT Gradual.

A título de simplificação, vamos considerar um TFT Gradual do tipo 2, estratégia G2, que se comprometa inicialmente a cooperar com o seu oponente incorrendo em um custo $c/2$, caso o seu oponente corresponda, G2 passará então, a partir do segundo contato, a cooperar totalmente e completamente nas rodadas seguintes. Isto equivale a incorrer um custo total de c .

Admita ainda que o benefício recebido pelo indivíduo focal advindo da cooperação seja proporcional ao custo incorrido pelo seu oponente. Ou seja, caso o oponente incorra num custo $c/2$ no ato cooperativo, o sujeito focal irá receber apenas $b/2$, e assim por diante. Por fim, como na tradicional modelagem da reciprocidade direta, admita que exista uma chance w da interação entre os dois indivíduos continuar numa próxima rodada.

Além da estratégia G2, vamos também considerar a estratégia Nunca Cooperar (ALLD).

Logo, a recompensa de um organismo adotando uma estratégia G2 em relação às outras existentes será:

$$\begin{aligned}
 V(G2|G2) &= \frac{1}{2}(b-c) + w(b-c) + w^2(b-c) + w^3(b-c) + \dots \\
 V(G2|G2) &= \frac{b-c}{1-w} - \frac{b-c}{2} \quad (52) \\
 V(G2|ALLD) &= -\frac{c}{2}
 \end{aligned}$$

A recompensa da estratégia ALLD interagindo com a estratégia G2, será:

$$V(ALLD|G2) = \frac{b}{2} \quad (53)$$

Comparando as recompensas das estratégias G2 com ALLD, verifica-se que uma estratégia G2 será um EEE contra uma estratégia não cooperativa (ALLD) se:

$$\begin{aligned}
 V(G2|G2) &> V(ALLD|G2) \\
 w &> \frac{c}{2b-c} \quad (54)
 \end{aligned}$$

Vamos considerar outro TFT gradual, que diferentemente do anterior, começa cooperando apenas com 1/3 de c e na segunda rodada passa a cooperar completamente com o seu oponente. A recompensa deste novo TFT gradual, estratégia G3, interagindo com ele mesmo e com um ALLD será:

$$\begin{aligned}
 V(G3|G3) &= \frac{1}{3}(b-c) + (b-c)w + (b-c)w^2 + (b-c)w^3 + (b-c)w^4 + \dots \\
 V(G3|G3) &= \frac{b-c}{1-w} - \frac{2}{3}(b-c) \quad (55)
 \end{aligned}$$

Comparando as recompensas das estratégias G3 com ALLD, verifica-se que uma estratégia G3 será um EEE contra uma estratégia não cooperativa (ALLD) se:

$$\begin{aligned}
 V(G3|G3) &> V(ALLD|G3) \\
 w &> \frac{c}{3b-2c} \quad (56)
 \end{aligned}$$

Vamos avaliar o quanto a desigualdade acima se tornaria mais ou menos restritiva sobre a desigualdade anterior $c/(2b-c)$.

$$\begin{aligned}\frac{c}{3b-2c} &< \frac{c}{2b-c} \\ 2b-c &< 3b-2c \\ b &> c\end{aligned}\quad (57)$$

Logo, como isso sempre irá ocorrer, i.e., $b > c$, então teremos:

$$\frac{c}{3b-2c} < \frac{c}{2b-c} < \frac{c}{b} \quad (58)$$

Vamos trabalhar com um caso mais geral de um TFT gradual, do tipo Gn:

$$\begin{aligned}V(Gn | Gn) &= \frac{1}{n}(b-c) + (b-c)w + (b-c)w^2 + (b-c)w^3 + (b-c)w^4 + \dots \\ V(Gn | Gn) &= \frac{b-c}{1-w} - \frac{n-1}{n}(b-c)\end{aligned}\quad (59)$$

Comparando as recompensas das estratégias Gn com ALLD, verifica-se que uma estratégia Gn será uma EEE contra uma estratégia não cooperativa ALLD se:

$$\begin{aligned}V(Gn | Gn) &> V(ALLD | Gn) \\ w &> \frac{c}{nb - (n-1)c}\end{aligned}\quad (60)$$

Vamos verificar que condições seriam necessárias para o w requerido por uma estratégia Gn seria inferior ao requerido por outra $G(n-1)$.

$$\begin{aligned}\frac{c}{nb - c(n-1)} &< \frac{c}{(n-1)b - c((n-1)-1)} \\ c &< b\end{aligned}\quad (61)$$

Ou seja, se $c < b$ sempre uma estratégia Gn irá requerer um w mínimo menor em relação a uma estratégia $G(n-1)$ para que a mesma seja uma EEE contra um mutante ALLD. Em outras palavras, quanto menor for o custo inicial, i.e., maior for o n , mais prudente pode ser considerada a estratégia, e conseqüentemente, menor seria o w mínimo requerido para que a estratégia seja uma EEE contra a invasão de um mutante ALLD.

Abaixo plotamos o comportamento da probabilidade w mínima, calculada mediante a relação

$$w > \frac{c}{nb - (n-1)c} \quad \text{para } b > c > 0. \quad (62)$$

Podemos observar o comportamento decrescente da probabilidade w mínima quando se aumenta o valor de n , que implica na diminuição do investimento inicial para que a cooperação possa evoluir de forma estável.

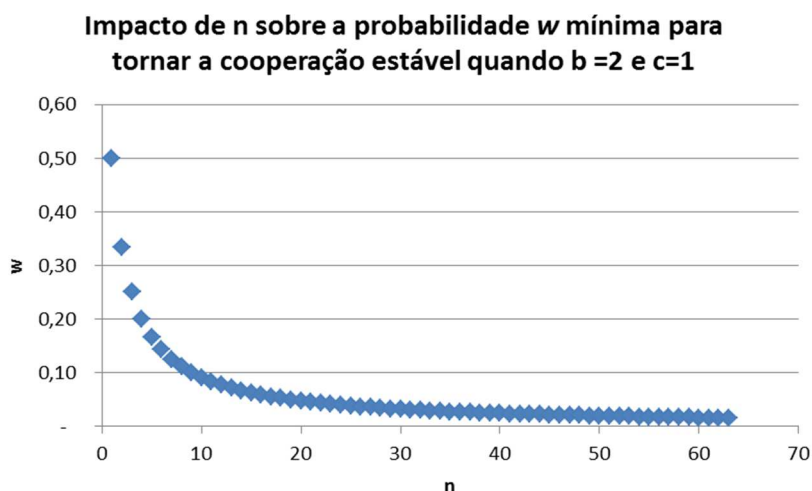


Figura 12 - Impacto de n sobre a probabilidade w mínima para tornar a cooperação estável quando $b=2$ e $c=1$ (elaborado pelo autor)

Outra forma de interpretar a conclusão obtida seria que quanto menor for o custo que se estaria disposto a incorrer no início da interação, menor seria a probabilidade mínima necessária requerida para que ocorra uma próxima interação (w), e com isso tornar/manter a cooperação estável.

Poderíamos interpretar este resultado, por exemplo, em termos de risco e retorno. No nosso caso, a evolução favoreceria estratégias menos arriscadas, i.e., que estivessem dispostas a investir menos do seu *fitness* no início de uma interação com um potencial colaborador.

Portanto, o resultado obtido nos indica que a prudência no momento de cooperar seria um catalisador para a evolução estável da cooperação. Estratégias menos prudentes estariam mais a mercê da invasão de estratégias não cooperativas.

13. O PAPEL DO INVESTIMENTO INICIAL E DO RUÍDO NA EVOLUÇÃO DO COMPORTAMENTO COOPERATIVO – DETALHAMENTO MATEMÁTICO DOS PRINCIPAIS MODELOS DA LITERATURA E A SUA UTILIZAÇÃO NA SIMULAÇÃO

No capítulo 12 por meio de um modelo simples foi possível demonstrar o impacto que o nível de investimento inicial pode ter na evolução da cooperação.

Neste capítulo exploraremos modelos com uma maior complexidade. Em especial, o modelo LRS de Wahl e Nowak (1999a, b) e o RTS de Roberts & Sherratt (1998).

Se por um lado os ganhos trazidos pelo aumento da complexidade são potencialmente imensos, por outro, nos impede de procurar as respostas necessárias meramente por meio da manipulação/demonstração algébrica das funções de recompensa das estratégias. Desta forma, a simulação baseada em agente será a nossa principal ferramenta para conduzir a pesquisa a partir deste ponto.

A seguir apresentamos o modelo LRS de Wahl e Nowak (1999a, b) que servirá como molde para criarmos as outras estratégias, i.e., através da parametrização apropriada podemos representar algumas das estratégias mais conhecidas como: ALLC, ALLD ou TFT.

Além dessas, é possível representarmos uma gama imensa de estratégias baseadas no investimento variável, exceto a estratégia RTS. Apesar disso, ainda é possível mediante algumas alterações no modelo LRS parametrizar também o RTS como será apresentado a seguir.

Por fim, é importante frisar que voltamos a discutir diversos pontos já mencionados anteriormente sobre o LRS e o RTS. Pode parecer prolixo, mas neste momento, nos ateremos a uma definição matemática mais formal destes modelos para o seu uso posterior nas simulações.

13.1. *Linear Reactive Strategies (LRS) de Wahl e Nowak (1999a)*

Wahl e Nowak (1999a) definem $S_{k,d,x_0}(x)$ como sendo a resposta de uma dada estratégia focal em função da resposta (x) do seu oponente, sendo que $x=1$ significa total cooperação e $x=0$, total não cooperação. Para exemplificar essa ideia considere a seguinte notação: $S(0) = 1$; ela nos diz que o organismo focal responde com total cooperação (1) a total não cooperação (0) do seu oponente.

Uma estratégia é caracterizada por meio da atribuição apropriada de valores para estes três parâmetros: d , k e x_0 . Sendo que d é a chance basal da cooperação, k é uma taxa de

incremento da chance de cooperação a ser realizado nas próximas rodadas e x_0 refere-se a chance inicial de cooperação.

A função de resposta $S(x)$ assume a forma de $S_{k,d,x_0}(x) = d + k.x$, que nada mais é do que uma função linear, justificando assim a ideia de estratégias linearmente reativas (LRS).

Esta função é delimitada em dois extremos, o primeiro, a total cooperação, que equivale a $S(x) = 1$; e a total não cooperação, que equivale a $S(x) = 0$. Dessa forma, o domínio de existência da função resposta $S(x)$ é o intervalo $[0,1]$. Se $d + k.x > 1$, então $S(x) = 1$, e se $d + k.x < 0$, então $S(x) = 0$.

É importante frisar que a recompensa obtida por cada estratégia decorre da ponderação dos benefícios e custos pelas respectivas funções de resposta. A título de exemplificação, considere um jogo simultâneo tendo uma estratégia A parametrizada com $S_{k,d,x_0}(x) = d + k.x$ interagindo com outra B, cuja função resposta assume $S_{k',d',x_0'}(x) = d' + k'.x$. Além disso, admita que os benefícios e custos advindos da cooperação sejam, respectivamente, b e c .

Neste caso, as recompensas obtidas pelas estratégias A e B, respectivamente, na rodada inicial são:

$$V(A|B) = b.x_0' - c.x_0 \quad (63)$$

$$V(B|A) = b.x_0 - c.x_0' \quad (64)$$

Já as recompensas obtidas pelas estratégias A e B, respectivamente, na próxima rodada serão:

$$V(A|B) = b.S'(x) - c.S(x) = b.(d + k.x_0) - c.(d + k.x_0') \quad (65)$$

$$V(B|A) = b.S(x) - c.S'(x) = b.(d + k.x_0') - c.(d + k.x_0) \quad (66)$$

Raciocínio análogo ao anterior pode ser feito para as próximas rodadas. Ao descrevermos a função resposta desta forma podemos representar boa parte das estratégias simplesmente pela parametrização, i.e., atribuição apropriada de valores para as variáveis d , k e x_0 . Por exemplo, dentre as estratégias conhecidas, temos que o:

- TFT é parametrizado por meio deste modelo da forma $S_{1,0,1}(x) = x$;
- ALLC é parametrizado por meio deste modelo da forma $S_{1,1,0}(x) = 1$;

- ALLD é parametrizado por meio deste modelo da forma $S_{0,0,0}(x) = 0$.

Usando esta forma de parametrizar as estratégias, Wahl e Nowak (1999a) identificam a existência de uma família de estratégias que juntamente com a estratégia ALLD constituem EEE. As condições comuns aos membros desta família de estratégias, conforme já mencionadas, são:

- Generosidade ($S(x) > x, \forall x$);
- Otimismo ($x_0 = 1$). Contudo, se o oponente deixa de cooperar, a estratégia imediatamente responde com um segundo movimento muito baixo ($S(0) = d < 1 - c/b$), e continua tentando aumentar as “apostas” gradualmente;
- Intransigência (se $x_0 = 1$ então $S(1) = 1$, mas se $x < 1$ então $S(x) < 1$ para todo x).

Com o intuito de realizar as simulações e a análise dessa família de estratégias apontadas por Wahl e Nowak (1999a) como sendo EEE, optamos por escolher uma estratégia desta família que a pudesse representá-la nas simulações.

Uma estratégia que satisfaz todas as três condições anteriores (a,b e c) é, por exemplo, $S_{0,5;0,5;1}(x) = 0,5x + 0,5$, com $b = 4$ e $c = 1$. Observe que ela é:

- Generosa, pois:

$$\begin{aligned}
 S(x) &> x \\
 0,5x + 0,5 &> x \\
 0,5x &< 0,5 \\
 x &< 1
 \end{aligned}
 \tag{67}$$

Portanto $S(x) > x$ quando $x < 1$. Mas, como a função resposta se encontra definida no domínio entre 0 e 1, e que não é possível que $S(x) > x$ seja verdadeiro para qualquer x quando assume-se que se $d + k.x > 1$, então $S(x) = 1$. Portanto, o único valor de x que não satisfaz esta $S(x) > x, \forall x$ é justamente $x = 1$. Quando x assumir este valor, teremos $S(x) = x$.

- Otimista, pois:

O valor de $x_0 = 1$ é parametrizado na estratégia. Além disso, $S_{0,5;0,5;1}(x)$ também satisfaz a condição $S(0) = d < 1 - c/b$ já que:

$$\begin{aligned}
S(0) &= d < 1 - c/b \\
S(0) &= 0,5 < 1 - \frac{1}{4} \\
S(0) &= 0,5 < 0,75 \quad (\text{verdadeiro})
\end{aligned}
\tag{68}$$

- Intransigente, pois:

A estratégia também satisfaz a condição $x_0 = 1$ e $S(1) = 1$, pois se o oponente responder $x_0 = 1$, então a resposta da estratégia será: $S(1) = 0,5x + 0,5 = 1$. Por outro lado, esta estratégia deixa de cooperar totalmente se:

$$\begin{aligned}
S(x) &< 1 \\
0,5x + 0,5 &< 1 \\
0,5x &< 0,5 \\
x &< 1
\end{aligned}
\tag{69}$$

Diante do que foi exposto observa-se que a estratégia $S_{0,5;0,5;1}(x) = 0,5x + 0,5$ atende todas as três condições quando $b=4$ e $c=1$, e, portanto, será o representante das estratégias LRS em equilíbrio de Nash nas nossas simulações.

13.2 *Raise-the-Stakes* (RTS) de Roberts e Sherratt (1998)

A estratégia RTS foi parametrizada com base numa modelagem LRS ligeiramente modificada. Assumindo a função resposta a forma:

$S_{k_1, k_2, d, x_0}(x^*) = k_1 \cdot x^* + k_2 \cdot d$, sendo que d é a chance basal da cooperação, k_1 é uma taxa de incremento da chance de cooperação a ser realizado nas próximas rodadas relacionado ao outro jogador, k_2 é uma taxa de incremento da chance de cooperação a ser realizado nas próximas rodadas relacionado ao jogador focal e x_0 refere-se a chance inicial de cooperação. O sinal de * sobrescrito em algumas variáveis indica que ela é uma variável condicionada, ou seja, dependendo da resposta do outro jogador em comparação com a do jogador focal ela pode assumir um ou outro valor.

Vamos adotar que x refere-se à resposta anterior do outro jogador e x_{focal} refere-se à resposta anterior do jogador focal.

Portanto, o RTS parametrizado desta forma é:

$S_{k_1, k_2^*, d, x_0}(x^*) = S_{1; \{0,1,2\}; m, a}(x^*) = x^* + k_2^* m$, sendo que k_2^* e x^* são parâmetros condicionais à resposta do outro jogador em relação ao do jogador focal; a e m são números pequenos e positivos.

Se $S(x) < x$, então $k_2 = 0$, e a função resposta é dependente de x_{outro} . Logo, assume: $S(x) = x$. Se $S(x) = x$ então $k_2 = 1$, e a função resposta é dependente de x_{focal} . Logo, assume: $S(x_{focal}) = x_{focal} + m$. Por fim, se $S(x) > x$, então $k_2 = 2$, e a função resposta ainda é dependente de x_{focal} . Logo, assume: $S(x_{focal}) = x_{focal} + 2m$.

Observe que apesar da parametrização ser intratável algebricamente para o caso do RTS, a mesma pode ser implementada com facilidade num modelo computacional para a simulação.

Semelhantemente ao LRS em equilíbrio de Nash, também tivemos que escolher um representante para a família de estratégias do tipo RTS a ser utilizado nas simulações. Optamos por atribuir o valor de 0,1 para os parâmetros a e m , resultando em

$S_{k_1, k_2^*, d, x_0}(x^*) = S_{1; \{0,1,2\}; 0,1; 0,1}(x^*) = x^* + 0,1.k_2^*$, sendo que:

$$\begin{cases} S(x) < x, k_2 = 0 \rightarrow S(x) = x \\ S(x) = x, k_2 = 1 \rightarrow S(x_{focal}) = x_{focal} + 0,1 \\ S(x) > x, k_2 = 2 \rightarrow S(x_{focal}) = x_{focal} + 0,2 \end{cases} \quad (70)$$

13.3 *Raise-the-Stakes-Modificado* (RTSM) de Roberts e Renwick (2003)

A adição da estratégia *Raise-the-Stakes-Modificada* (RTSM) foi motivada pelo artigo de Roberts e Renwick (2003), o qual utilizou um conjunto de universitários para testar se as pessoas fazem uso de uma estratégia do tipo RTS quando travam relações de cooperação. A pesquisa concluiu que os investimentos iniciais feitos pelos estudantes tendiam a ter valores intermediários, ou seja, nem tão baixos quanto como as de uma estratégia RTS e nem o valor máximo possível, conforme o modelo de Wahl & Nowak (1999a). Tendências de se aumentar os investimentos, rodada a rodada, foram observadas, aliado a uma forte propensão dos sujeitos em equiparar (*matching*) na rodada atual o investimento recebido na rodada anterior.

Dessa forma o RTSM inicia com valores intermediários de investimento. Para efeitos de simulação adotamos que $x_0 = 0,5$, com a tendência de equiparar (*matching*) na rodada atual

o investimento recebido na rodada anterior. Mediante as considerações anteriores e parametrizando esta estratégia pela “linguagem” do LRS ela assumirá a forma: $S_{1;0;0,5}(x) = x$.

Perceba que ela é muito semelhante ao TFT, se diferenciando apenas pelo valor do parâmetro x_0 ser menor. Por conta disso, podemos considerar o RTSM como sendo uma espécie de TFT mais cauteloso, i.e., mais prudente no seu investimento inicial.

Além disso, enfatizamos que a denominação RTS modificado não provém de Roberts e Renwick (2003), mas foi adotado neste trabalho para facilitar futuras referências desta estratégia quando se fizer necessário.

13.4 Modelando o ruído no Dilema do Prisioneiro Contínuo e Iterado

Nós modelaremos um dilema do prisioneiro contínuo e iterado com erros da mesma forma que Wahl e Nowak (1999b).

Para isso considere que em cada rodada existe uma probabilidade p de um erro poder ocorrer. Este erro está relacionado com a má interpretação do movimento anterior, i.e., um erro de percepção.

Desta forma, o jogador focal ao invés de responder com $y = S(x)$ ao movimento anterior x , o mesmo, irá responder com $y = S(u)$, sendo que u é uma variável aleatória distribuída uniformemente entre 0 e 1.

Ao modelar o ruído desta forma, recai-se num caso extremo, no qual o jogador acaba não tendo nenhuma informação sobre o movimento do oponente.

Wahl e Nowak (1999b) enfatizam que modelar x como sendo uma variável aleatória é ligeiramente diferente de modelar y como sendo uma variável aleatória, tal que $y = u \in [0, 1]$. Neste caso os jogadores poderiam cometer “erros” inconsistentes com suas próprias estratégias.

14. NETLOGO E A FERRAMENTA TRACE DO MODELO PROPOSTO

14.1. NetLogo e seu ambiente de programação – aspectos gerais

A simulação foi desenvolvida no NetLogo. A escolha do NetLogo se pautou nos seguintes pontos:

- I) Constante atualização para correção de erros e melhorias no programa;
- II) Farta documentação no site da plataforma;
- III) Boa comunidade de desenvolvedores (*NetLogo Users – Yahoo Groups*), facilitando a comunicação, o esclarecimento de dúvidas de programação.
- IV) Distingue-se como uma das melhores plataformas para iniciantes provendo de uma linguagem de programação simplificada e de uma interface gráfica que permitem ao usuário observar e fazer uso de ABMS sem a necessidade de conhecer detalhes complexos da sua linguagem de programação (Railsback & Grimm, 2012);
- V) Apesar da sua simplicidade/facilidade para o iniciante, o NetLogo encontra-se presente no desenvolvimento de diversos modelos publicados em diversos periódicos científicos (Railsback e Grimm, 2012).
- VI) Gratuito

O NetLogo foi criado em 1999 por Uri Wilensky no Centro para a Aprendizagem Conectada e Modelagem Baseada em Computadores (CCL), na Universidade de Tufts. Em 2000, o CCL se mudou para a Universidade de Northwestern.

Desde 1999, o NetLogo já passou por diversas atualizações: 1.0 em 2002, 2.0 em 2003, 3.0 em 2005, 4.0 em 2007, 4.1 em 2009 e 5.0 em 2012.

Ele foi originalmente criado como uma ferramenta educacional, mas o seu uso na ciência tem crescido muito rapidamente, e o próprio NetLogo tem mudado para poder atender melhor às necessidades dos cientistas (Railsback e Grimm, 2012).

No NetLogo existem quatro tipos de agentes:

- I) Agentes que se movimentam, que são chamados de *turtles*;
- II) Agentes estáticos que representam o “Mundo” no qual ocorre a simulação. Eles são chamados de *patches*. Na prática um *patch* equivale a um retângulo unitário. A união de todos os *patches* resulta no “Mundo”;

- III) Agentes que conectam dois *turtles*, permitindo representar um relacionamento entre eles, são chamados de *links*;
- IV) Existe a figura do observador que possui controle total da simulação, podendo introduzir novos agentes, além de inspecionar os atributos desses agentes ao longo da simulação. O observador pode também influenciar nas variáveis da simulação. Na prática o papel do observador é de extrema importância no processo de verificação do modelo.

Cada tipo de agente possui atributos ou variáveis de estados próprias, além de comandos próprios. Durante a construção do modelo de simulação é possível acrescentar outros atributos aos agentes, além dos existentes ao padrão (*default*) do NetLogo. Por exemplo, dentre os atributos que são padrões para os *patches* estão: localização na forma de coordenadas x (*xcor*) e y (*ycor*) ou a sua cor, e poderíamos acrescentar, por exemplo, um novo atributo chamado de elevação para cada *patch*.

Um fato que torna o NetLogo bastante amigável para o iniciante é a sua biblioteca de *primitives* para os agentes. Uma *primitive* é um procedimento, i.e., uma função pré-programada que pode tanto dizer para um dado agente desempenhar uma ação, neste caso chamamos este *primitive* de *command*, podendo ser, desde se mover, a se reproduzir ou a trocar de cor; outro uso para uma *primitive* seria de reportar o resultado de uma função para uma dada variável, e.g., existe a função *mean* que fornece a média de um conjunto de valores. Neste caso, chamamos este *primitive* de *reporter*.

Os *primitives* abrangem um vasto repertório de ações para cada tipo de agente e o seu uso permite criar códigos bem enxutos, poupando bastante o trabalho de programação.

O ambiente do NetLogo abrange três abas: *Interface*, *Info* e *Code*.

A aba *Interface* é onde podemos visualizar o andamento da simulação, i.e., a interação entre os agentes no transcorrer do tempo da simulação. É possível acelerar ou retardar o andamento da simulação por um controle deslizante. Na figura 13, pode-se ver que o controle deslizante se encontra na velocidade padrão (*default*) normal.

Na aba *Interface* também podemos adicionar dispositivos que permitem alimentar a simulação com os valores a serem utilizados no início ou ao longo da simulação. Dentre os

dispositivos possíveis estão: controles deslizantes, interruptores, caixa de seleção e caixa de entrada.

Além dos dispositivos de entrada de dados, também podemos posicionar nesta aba, dispositivos de saída, i.e., que permitem obter os dados de saída do modelo. Estes podem ser na forma de um gráfico que permite acompanhar a evolução de uma ou várias variáveis ao longo de tempo, ou, por meio de uma caixa de saída que permite acompanhar o exato valor de uma variável ou de várias variáveis em cada instante da simulação.

Por fim, pode-se observar na parte inferior da aba *Interface*, uma caixa de entrada e a indicação de *observer*. É através desta caixa de entrada que o observador poderá interagir com os elementos da simulação.

Sobre as duas abas restantes, a aba *Info* possibilita inserir informações relacionadas ao modelo. Nesta aba podemos descrever o propósito, funcionamento, variáveis e processos utilizados no modelo, assim como qualquer outra informação relevante ao modelo ou no processo de modelagem.

Por fim, é na aba *Code* que escrevemos o código do modelo. Todos os aspectos descrito anteriormente sobre o ambiente do NetLogo podem ser observados na figura 13.

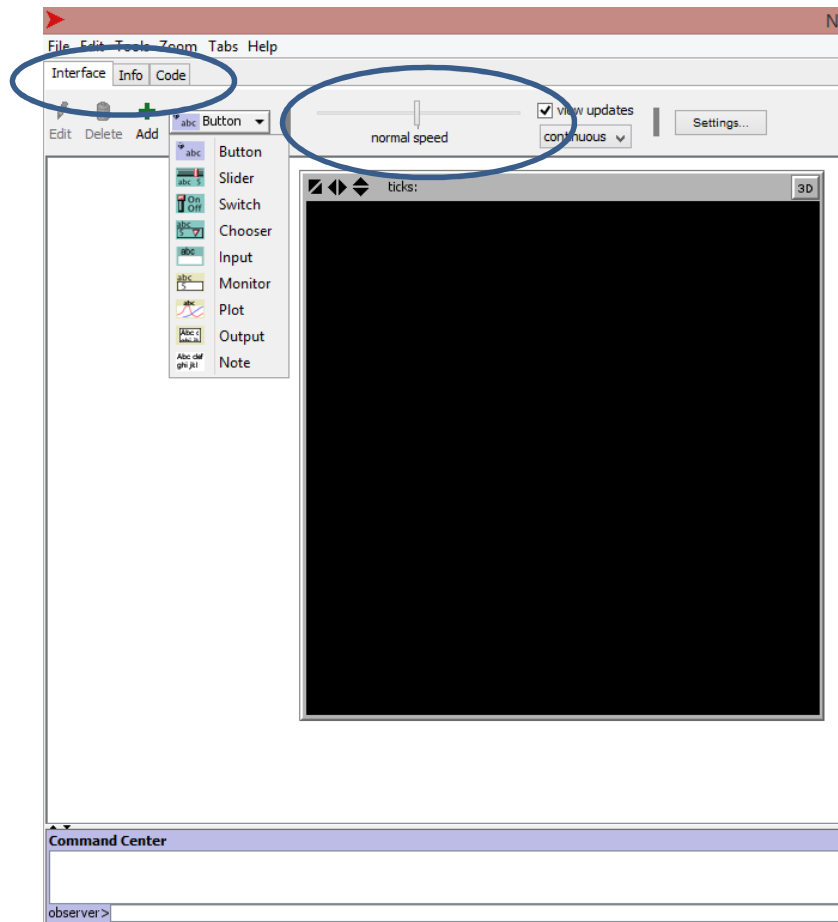


Figura 13 – O ambiente do NetLogo (elaborado pelo próprio autor)

Além disso, recomendamos duas ótimas publicações para aqueles que desejarem aprender mais sobre este programa: Railsback e Grimm (2012) e Wilensky e Rand (2015).

14.2. TRACE do modelo

Nas próximas seções serão apresentadas a ferramenta TRACE adaptada, assim como o protocolo ODD, para o modelo utilizado nas nossas simulações.

Infelizmente pelo próprio formato que uma tese exige não será possível conciliar toda a pesquisa pelo formato da ferramenta TRACE. Desta forma, até certo ponto procurou-se ser bastante fiel tanto a estrutura do TRACE quanto ao do ODD.

É importante frisar que isso não impediu que todos os pontos exigidos por ambos instrumentos fossem tratados no trabalho, mas infelizmente, não organizados da maneira como recomendada principalmente pelo TRACE.

Especificamente os tópicos do TRACE relacionados com a verificação das saídas do modelo assim como a sua análise serão abordados em capítulos próprios da tese nos quais serão

apresentados tanto os resultados para cada experimento, assim como serão discutidos, na medida do possível, os efeitos de calibração, sensibilidade dos resultados aos parâmetros utilizados dentre outros pontos sugeridos pelo TRACE.

Já o tópico referente a corroboração das saídas do modelo equivale aos capítulos discussão e conclusão da tese.

Ademais, com exceção dos pontos mencionados, o restante do capítulo apresenta o modelo utilizado nas simulações sendo bastante fiel tanto a estrutura quanto com as informações exigidas tanto pelo TRACE quanto pelo ODD.

O primeiro tópico do TRACE refere-se à formulação do problema, mas como já fizemos isso nos capítulos 6.4 e 8, abordaremos o protocolo ODD do modelo.

14.2.1. Descrição do Modelo ou protocolo ODD do modelo

14.2.1.1 Propósito do Modelo

O propósito do modelo é simular populações haplóides compostas por seis estratégias explorando por meio de uma análise no formato de torneio a estratégia mais adequada a ser empregada num dilema do prisioneiro contínuo e iterado com e sem a presença de ruídos. Nesta simulação foram consideradas algumas das estratégias mais relevantes identificadas na literatura: ALLC, ALLD, TFT, RTS, LRS e RTSM.

14.2.1.2. Entidades, Variáveis de Estado e Escalas

Todas as estratégias implementadas na simulação foram parametrizadas com base no modelo LRS de Wahl e Nowak (1999a), com exceção do RTS, o qual foi parametrizado com uma ligeira alteração deste modelo.

Basicamente o modelo de simulação conta com dois tipos de entidades: os agentes e as ligações ou *links*. Essas ligações ou *links* são representados como segmentos de reta no modelo e interligam dois agentes no início de cada rodada.

Cada agente é dotado de uma dentre seis estratégias possíveis: ALLC, ALLD, TFT, RTS, LRS e RTSM.

No início de cada simulação é possível fixar a população inicial de cada uma dessas estratégias mediante as barras deslizantes.

Cada agente ou organismo possui um conjunto de atributos ou variáveis de estado que o caracterizariam, os diferenciando dos demais.

Este vetor de atributos pode conter tanto variáveis numéricas quanto referências sobre a estratégia adotada.

Os atributos acrescentados para cada organismo, além dos *default* existentes, são: idade, *fitness*, *k*, *d*, *x₀*. Outros atributos menos autoexplicativos são:

- Primeira? indica se uma dada rodada frente a um oponente é a primeira ou não. Ela participa no cálculo da recompensa dos organismos, já que, a maneira de calcular a resposta da primeira rodada difere das demais rodadas;
- Memo1 e memoaux são variáveis de memória. Memo1 se refere a memória da última rodada enquanto memoaux funciona unicamente como uma memória temporária para cálculo das recompensas e atualização do *fitness*;
- Disponível? indica se um dado organismo se encontra disponível (1) ou não (0) para jogar o dilema do prisioneiro contínuo e iterado com outro;
- Ordem assume o valor de 1 ou 2 e indica a ordem da jogada de um dado jogador num jogo do tipo alternado;
- *Percepcao* pode assumir qualquer valor no intervalo [0,1] e se refere a percepção do jogador focal a respeito da resposta do seu oponente. Utilizaremos este atributo para simular o ruído nos torneios com jogadas alternadas.

O único atributo acrescentado para as entidades *links* ou associações é velho?. Ele assume o valor de 0 se uma dada rodada frente a um oponente for a primeira, e 1, caso contrário. O mesmo participa na fixação das ordens dos jogadores num jogo do tipo alternado.

Na figura 14 podemos visualizar três organismos (triângulos) e um *link* ou associação. O *link* é representado pelo segmento de reta que interliga o organismo amarelo com o vermelho. Duas pequenas janelas são apresentadas à direita. Através delas podemos inspecionar os valores dos atributos do organismo all2 (vermelho) e do *link* 02.

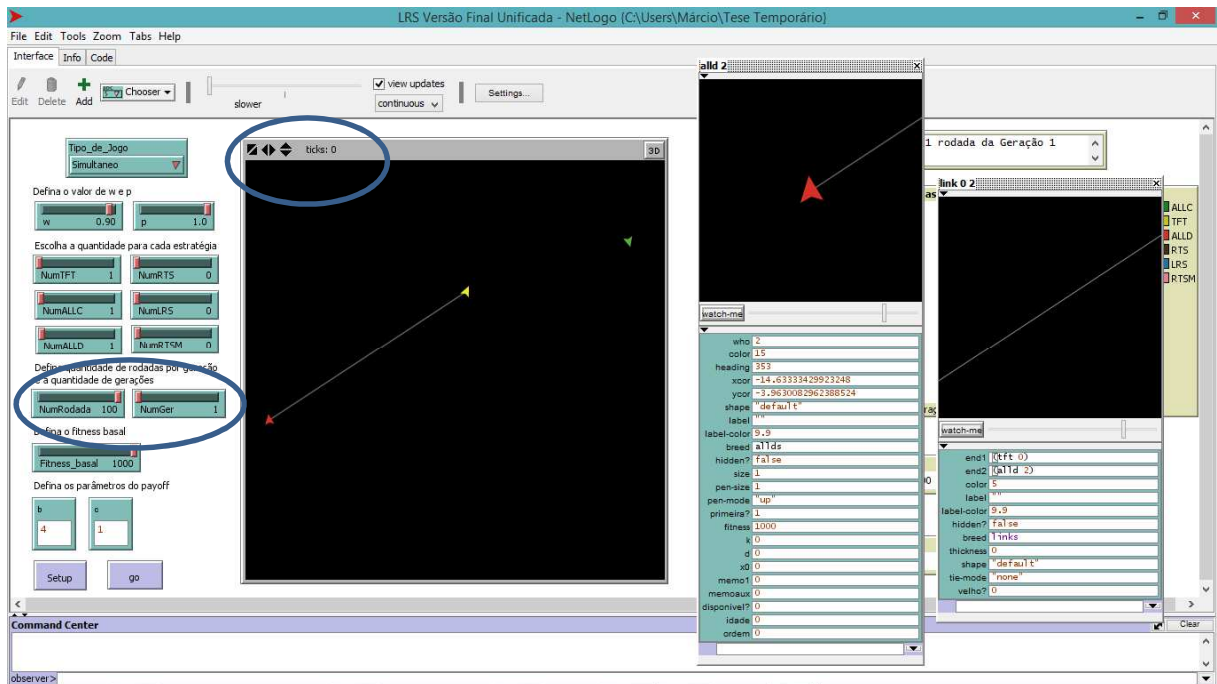


Figura 14 – Tela principal do modelo com as janelas de inspeção de atributos abertas para um agente e para um link (elaborado pelo autor)

A unidade de tempo utilizada na nossa simulação é o *tick*.

O *tick* é a maneira utilizada pelo NetLogo de considerar a passagem do tempo, i.e., corresponde ao relógio do NetLogo. No nosso caso, o *tick* equivale a uma rodada de um jogo, e ele sempre inicia com valor igual a 0 no começo de cada geração. Este detalhe pode ser observado na figura 14. Ainda nesta figura, perceba que estamos simulando uma única geração com 100 rodadas.

14.2.1.3. Visão geral dos processos e seu sequenciamento no jogo simultâneo com e sem ruído

Os processos envolvidos num jogo simultâneo são em alguns aspectos diferentes daqueles de um jogo alternado.

Por conta disso preferimos separar blocos de processos para cada tipo de jogo no modelo.

Até seria possível ter um único bloco de processo para lidar com estas duas possibilidades de sequenciamento de jogo, tornando o código mais enxuto, mas deixá-lo assim permitiu ganhos na verificabilidade e facilidade na identificação de erros do programa.

No código do modelo, apresentado em anexo, pode ser observado que atribuímos ao final dos processos referentes especificamente ao jogo simultâneo a terminação `_simultaneo`. Procedimento semelhante foi feito também para o caso alternado.

Em vista desta separação por blocos, detalharemos inicialmente os processos e a sua ordem de ocorrência no caso do jogo ser simultâneo com ou sem ruído. Em seguida, faremos o mesmo para o jogo alternado.

No início de cada torneio foram criados o mesmo número de agentes para cada uma das seis estratégias.

A cada rodada, os seguintes processos, ou submodelos, são executados em sequência para todos os organismos. Ao final de cada processo, as variáveis de estado ou atributos são atualizados imediatamente.

A sequência dos processos que comanda o comportamento dos agentes a cada rodada, num jogo do tipo simultâneo com e sem ruído, é apresentada a seguir:

1° `Escolher_parceiro` - pede para que um organismo com status disponível? igual a 1 procure outro organismo disponível para que então ambos possam jogar o dilema.

2° `Calcular_payoff_Simultaneo` – é feito o cálculo das recompensas obtidas pelos jogadores naquela rodada juntamente com a atualização da sua variável de estado *fitness*.

3° `Atualizar_memória_Simultaneo` – esta *procedure* permite que cada jogador avalie a jogada do seu oponente considerando a existência de ruído, i.e., mediante uma probabilidade de se cometer um erro de percepção. O erro de percepção ocorre quando o jogador percebe de forma errônea a jogada do seu oponente, mesmo que ele tenha recebido os benefícios em decorrência da jogada correta. Por causa disso que computamos primeiramente as recompensas recebidas na rodada, e depois, atualizamos a memória mediante a existência de ruído.

4° `Atualizar_memória_1_Simultaneo` – determina a resposta do jogador focal na próxima rodada em vista da resposta dada pelo oponente que pode estar ou não afetada pelo erro de percepção. Esta resposta é armazenada na variável de estado `memoaux`.

5° `Atualizar_memoria_2` – Avalia e readequa a resposta do jogador para que ela se encontre limitada entre o intervalo 0 e 1, i.e., dentro do domínio de existência da função de

resposta $S(x)$. Após isso, transfere a informação contida na variável de estado `memoaux`, que é uma espécie de memória temporária, para a variável de estado `memo1`.

6° `Continuar_terminar` – Ao final de cada rodada é determinado se cada díade continua ou não jogando o dilema por mais uma rodada. Esta escolha tem como base o valor do parâmetro w .

7° `Reset_x0` – Os valores do parâmetro x_0 são novamente fixados aos seus respectivos valores do início da simulação. Pois sofrem alterações em virtude da *procedure* `Atualizar_memória_Simultaneo`.

8° `Selecao` – O processo de seleção tem início apenas ao final de cada geração que equivale nas nossas simulações a 100 rodadas. Primeiramente, elimina-se todas as associações ou *links* existentes entre os organismos. Passa-se então a verificar e eliminar organismo(s) que tenha(m) um valor de *fitness* negativo. Após isso, elimina-se o ou um dos organismos com o menor valor para o atributo *fitness*, e ao mesmo tempo, cria-se uma nova cópia idêntica do organismo com o maior valor para este atributo. Por fim, todos os atributos são inicializados e os organismos são alocados aleatoriamente para um novo ponto no espaço, para que então possa ter início uma nova geração.

14.2.1.4. Visão geral dos processos e seu sequenciamento no jogo alternado com e sem ruído

Boa parte dos processos utilizados no jogo alternado são bem semelhantes ao do jogo simultâneo, em alguns casos, com ligeiras modificações.

Assim serão feitas apenas comentários e observações para apontar as diferenças entre os processos que sejam comuns para estes dois tipos de jogo.

A sequência dos processos que comanda o comportamento dos agentes a cada rodada, num jogo do tipo alternado com e sem ruído é:

1° `Escolher_parceiro` – este processo é compartilhado tanto pelo jogo alternado quanto pelo simultâneo.

2° `Atribuir_ordem` – esta *procedure* é particular ao jogo alternado e define por um processo aleatório, a ordem dos jogadores no dilema, i.e., quem será o 1° e o 2° jogadores.

3° Atualizar_memória_Alternado – esta *procedure* tem o mesmo objetivo ao da versão simultânea. Mas, diferente desta, utiliza a variável de estado *percepcao* para armazenar a jogada do seu oponente considerando a existência de ruído.

4° Atualizar_memória_1_Alternado – a lógica subjacente a este processo é idêntica ao do caso simultâneo.

5° Calcular_payoff_2 – é feito o cálculo da recompensa obtida pelo 2° jogador naquela rodada juntamente com a atualização da sua variável de estado *fitness*.

6° Calcular_payoff_1 – é feito o cálculo da recompensa obtida pelo 1° jogador naquela rodada juntamente com a atualização da sua variável de estado *fitness*.

7° Atualizar_memoria_2 – é idêntico ao caso simultâneo.

8° Continuar_terminar – idem ao caso simultâneo.

9° Reset_x0 – igual ao jogo simultâneo.

10° Selecao – também idem ao caso simultâneo.

Um diagrama de fluxo dos processos descritos é fornecido abaixo e procura descrever de uma forma bem resumida os principais processos e a sua respectiva sequência no processo de simulação tanto para o jogo alternado quanto para o simultâneo.

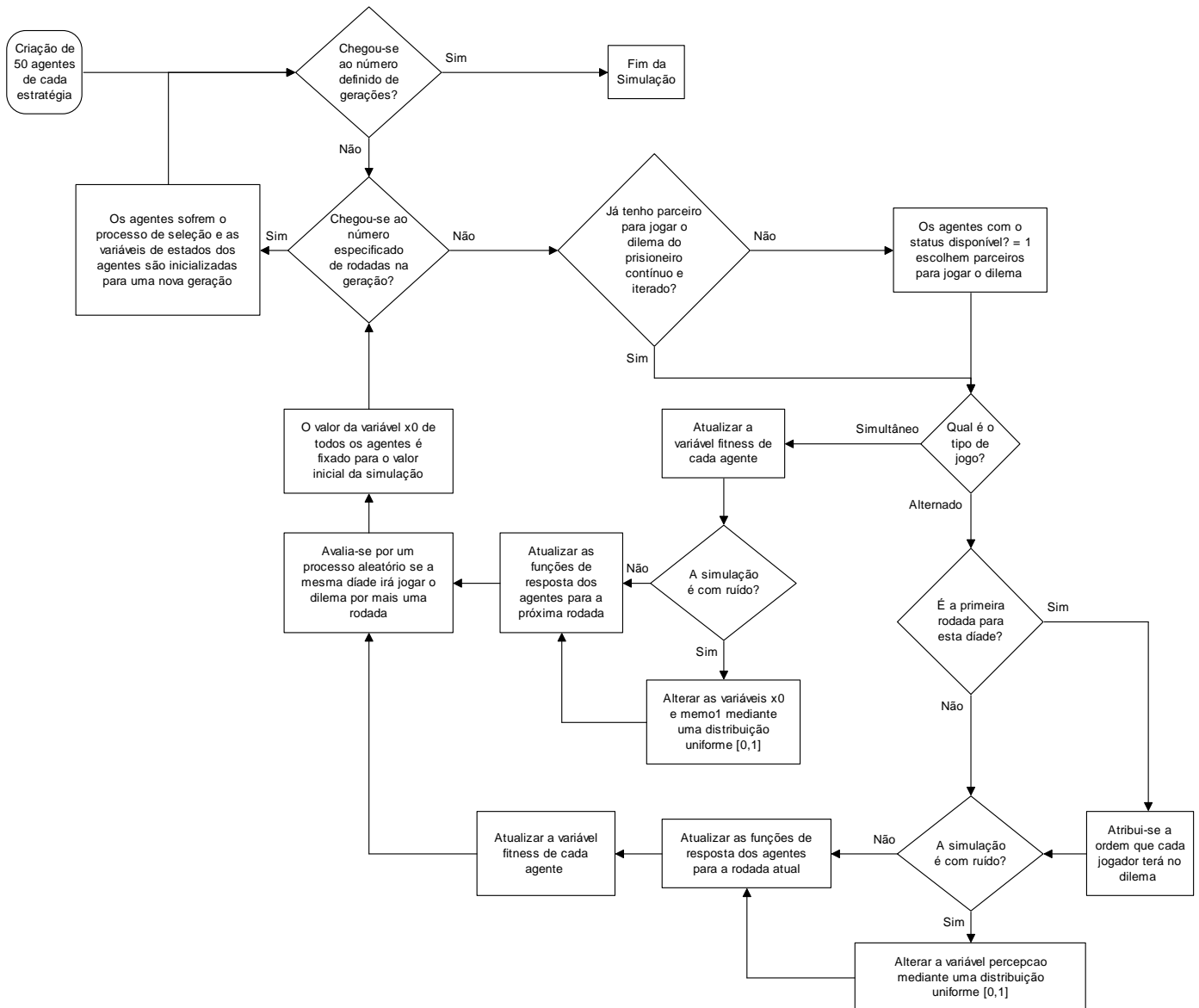


Figura 15 – Diagrama de fluxo com os principais processos do modelo (elaborado pelo autor)

Cada submodelo será descrito detalhadamente na seção 14.2.1.8.

14.2.1.5. Atributos do projeto

a) Emergência: Dinâmicas populacionais emergem a partir do comportamento dos organismos e da sua interação um com os outros: as dinâmicas populacionais são reguladas pela quantidade de *fitness* acumulada pelos organismos ao final de cada geração. O *fitness* inicial ou basal, a quantidade de rodadas por geração e a probabilidade de que a díade continue por mais uma rodada (w), a probabilidade de ocorrência do erro (p) e a quantidade inicial de cada estratégia são impostas através dos parâmetros iniciais; apesar disso, observa-se que a alteração destes parâmetros gera resultados complexos que são em certo grau independentes dos organismos.

b) Adaptação: Conforme os pressupostos da teoria dos jogos evolucionária, cada organismo foi dotado com uma estratégia ao longo do seu ciclo de vida. A ausência da racionalidade implica que não existe a preocupação clara de otimizar as recompensas decorrente das iterações entre os agentes, mas por outro lado, estratégias reativas como o TFT, LRS, RTS e o RTSM, ao responderem com uma redução parcial ou total dos seus investimentos frente a não cooperadores, tenderão a maximizar indiretamente a sua aptidão total. Consequentemente, isso pode se traduzir talvez numa melhor adaptação em comparação com estratégias mais passivas como, e.g., ALLC.

c) Objetivos: Os agentes não agem com base em nenhum tipo de objetivo. Eles são pré-programados com uma das seis estratégias apresentadas anteriormente. No início da simulação as díades são formadas ao acaso e ao final de cada geração o sucesso é medido pelo critério do *fitness* darwiniano.

d) Aprendizagem: O modelo não possibilita a aprendizagem do organismo, i.e., ao longo do seu ciclo de vida nenhum organismo alteraria a sua estratégia como consequência das suas experiências.

e) Predição: A ausência de racionalidade dos agentes e dotação de uma estratégia determinada ao longo da vida dos organismos impedem qualquer tipo de predição do futuro ou estimativa futura das consequências das suas decisões.

f) Percepção: mesmo a população sendo formada por no máximo seis estratégias bem definidas, não é possível para o organismo perceber com qual dessas seis estratégias ele se encontra interagindo. Os mecanismos pelos quais os organismos obtêm informações são modelados explicitamente, e.g., na formação das díades é atribuído para cada organismo o papel do 1º ou 2º jogador num jogo do tipo alternado.

g) Interação: as interações são diretas com cada organismo encontrando randomicamente outro para dar início a um jogo do tipo dilema do prisioneiro contínuo e iterado.

h) Estocasticidade: a aleatoriedade está presente no modelo na formação das díades, na definição da ordem dos jogadores num jogo do tipo alternado; ela também afeta a chance de uma mesma díade continuar a interagir por mais uma rodada e na probabilidade de ocorrência do erro de percepção. No processo de seleção dado que mais de um indivíduo apresente o mesmo valor de *fitness*, seja ele o maior ou o menor valor, haverá a escolha aleatória de um

indivíduo de um desses grupos para ser eliminado ou para aumentar em uma unidade na população da próxima geração.

i) Coletividade: os organismos são agrupados por uma das seis estratégias pré-definidas e suas propriedades são definidas na inicialização do modelo. As saídas do modelo são agregadas ao nível de cada estratégia apesar das interações serem entre organismos individuais.

j) Observação: a frequência de cada estratégia ao final de cada geração e o seu respectivo *fitness* médio juntamente com o tempo da simulação, dado pela quantidade de gerações, são as informações monitoradas e constituem as saídas do modelo.

14.2.1.6. Inicialização

As simulações eram inicializadas com os indivíduos randomicamente distribuídos no ambiente. Os parâmetros de inicialização das estratégias assumiam sempre os mesmos valores apresentados no quadro 15:

<i>Atributo ou Variável de Estado</i>	<i>Valores</i>
Disponível?	1
Primeira?	1
memo1	0
memoaux	0
ordem	0
<i>Percepcao</i>	0
<i>Fitness Basal</i>	1000
<i>x0</i>	Assume um valor específico de acordo com cada estratégia
<i>k</i>	
<i>d</i>	

Quadro 15 – Valores de inicialização dos atributos dos agentes (elaborado pelo próprio autor)

Os valores atribuídos para o benefício e custo foram, respectivamente, $b = 4$ e $c = 1$ em referência a McElreath e Boyd (2007). Wahl e Nowak (1999a) usam $b = 2$ e $c = 1$, assim como $b = 5$ e $c = 1$, em suas simulações. Optou-se em atribuir um *fitness* basal relativamente alto em comparação com os custos, benefícios e o número de rodadas consideradas para a simulação, implicando uma seleção fraca.

Nos torneios fazíamos w variar de 0 a 95% com incrementos de 5%. Mas naquelas simulações em que foram necessárias fixar um valor inicial para a probabilidade (w), a chance da iteração continuar por mais uma rodada, escolheu-se um valor de 50% ($w = 50\%$). McElreath

e Boyd (2007), assim como Wahl e Nowak (1999a), utilizam também este valor nas suas simulações.

O valor associado à probabilidade de ocorrência do erro de percepção (p) também precisou ser definido no início de cada simulação. Um valor de p igual a zero equivale a situação de ausência de ruído. Semelhantemente ao parâmetro w , variou-se o valor de p entre 0 e 10% com incrementos de 1% para avaliar o efeito do ruído tanto no torneio com jogadas simultâneas quanto alternadas.

Cada torneio iniciava com 50 agentes para cada uma das seis estratégias, totalizando assim, uma população com 300 organismos. Em razão do mecanismo de seleção adotado no modelo, o número de agentes na população permanecia constante.

Fixamos um total de 100 rodadas por geração, enquanto que a quantidade de gerações era variável.

O torneio terminava quando uma única estratégia sobrevivesse e as outras cinco eram extintas ou após 2500 gerações, independentemente, do jogo ser simultâneo ou alternado, com ruído ou sem ruído.

14.2.1.7. Dados de Entrada

O modelo não utiliza dado de entrada para representar fatores ou pressões externas.

14.2.1.8. Submodelos

Obedecendo a sequência já apresentada na seção 14.2.1.3 e 14.2.1.4, temos abaixo o detalhamento de cada submodelo e/ou rotina do programa para um jogo do tipo alternado e simultâneo com e sem ruído:

a) Pseudo-código de Escolher_parceiro:

```
while houver na população dois ou mais organismos com status disponível? igual a 1
  seleccione aleatoriamente dois organismos com status disponível? igual a 1 e
  crie um link
    set velho? igual a 0
    set disponível? igual a 0
```

b) Pseudo-código de Atribuir_ordem:

```
ask para os links com velho? igual a 0
  ask para o organismo que estiver no end1 do link set ordem 1
  ask para o organismo que estiver no end2 do link set ordem 2
```

c) Pseudo-código de Atualizar_memória_Simultaneo

```

ask para os links
  ask para cada agente do link
  if for a primeira rodada daquele jogo
    if o valor da prob referente ao erro de percepção >= do que um valor
      aleatório ∈ [0,1]
      set x0 igual um valor aleatório ∈ [0,1]
    else
      if o valor da prob referente ao erro de percepção >= do que um valor
        aleatório ∈ [0,1]
        set mem01 igual um valor aleatório ∈ [0,1]

```

d) Pseudo código de Atualizar_memória_Alternado

```

ask para os links
  ask para cada agente do link
  if for a primeira rodada daquele jogo
    if o valor da prob referente ao erro de percepção >= do que um valor
      aleatório ∈ [0,1]
      set percepcao igual a um valor aleatório ∈ [0,1]
    else
      set percepcao igual a x0
  else
    if o valor da prob referente ao erro de percepção >= do que um valor
      aleatório ∈ [0,1]
      set mem01 igual a um valor aleatório ∈ [0,1]
    else
      set percepcao igual a mem01

```

e) Atualizar_memória_1_Simultaneo e Atualizar_memória_1_Alternado

Quando o status da variável primeira? for igual a 1, i.e., quando uma dada rodada for a primeira. Então, para atualizar a memória serão utilizadas as variáveis x_0 e memoaux se jogo for simultâneo, e as variáveis *percepcao* e memoaux, se o jogo for alternado. A variável de estado memoaux armazenará a resposta do organismo focal frente a resposta x_0 ou *percepcao* do seu oponente.

Para as futuras rodadas, semelhante a situação anterior, continuaremos a utilizar duas variáveis de estado para atualizar a memória: mem01 e memoaux.

O papel de memoaux é de ser uma memória temporária que participa no cálculo da resposta de um organismo focal frente a jogada do seu oponente numa dada rodada. Contrapondo memoaux, mem01 funciona como uma memória permanente que guarda informações de uma dada rodada para ser usada na rodada seguinte.

O papel de mem01 será de armazenar o valor de memoaux da rodada anterior e servir como referência para que cada organismo possa determinar a sua resposta, em conformidade com a sua estratégia, na rodada atual. As funções de resposta de cada estratégia podem ser vistas no capítulo 13.

f) Calcular *payoff_Simultaneo*

Em termos das equações utilizadas, temos que o *fitness* de cada organismo será calculado num jogo do tipo simultâneo, para a primeira rodada e as seguintes, respectivamente como:

$$fitness_{novo} = fitness_{antigo} + b.x_o \text{ do outro organismo} - c.x_o \text{ do organismo focal} \quad (71)$$

$$fitness_{novo} = fitness_{antigo} + b.memo_1 \text{ do outro organismo} - c.memo_1 \text{ do organismo focal} \quad (72)$$

g) Calcular *payoff_1_Alternado*

O valor da variável *fitness* do 1º jogador será atualizado num jogo do tipo alternado, para a primeira rodada e as seguintes, respectivamente pelas seguintes equações:

$$fitness_{novo} = fitness_{antigo} + b.memoaux \text{ do outro organismo} - c.x_o \text{ do organismo focal} \quad (73)$$

$$fitness_{novo} = fitness_{antigo} + b.memoaux \text{ do outro organismo} - c.memo_1 \text{ do organismo focal} \quad (74)$$

h) Calcular *payoff_2_Alternado*

Já os *fitness* do 2º jogador serão calculados num jogo do tipo alternado, para a primeira rodada e as seguintes, respectivamente como:

$$fitness_{novo} = fitness_{antigo} + b.x_o \text{ do outro organismo} - c.memoaux \text{ do organismo focal} \quad (75)$$

$$fitness_{novo} = fitness_{antigo} + b.memo_1 \text{ do outro organismo} - c.memoaux \text{ do organismo focal} \quad (76)$$

i) Pseudo-código de Atualizar *memoria_2*

```
ask todos os organismos
  if memoaux for maior do que 1
    set memol igual a 1
  if memoaux for menor do que 0
    set memol igual a 0
  else
    set memol igual a memoaux
```

j) Reset *x0*

```
ask todos os organismos
  set x0 igual ao seu valor no início da simulação
```

k) Pseudo-código de Continuar_terminar

```
ask para cada link
  let uma variável aleatória prob  $\in [0,1]$ 
  if prob for maior do que w
    ask para que aquele link die
    ask para os organismos que estiverem em cada ponta daquele link
      set disponível? igual a 1
      set primeira? igual a 1
```

l) Pseudo-código de Selecao_natural_2

```
ask para todos os links die
ask para um dos organismos que possua o menor fitness die
ask para um dos organismos que possua o maior fitness hatch uma cópia
ask para todos os organismos
  set idade 0
  set disponível? igual a 1
  set primeira? igual a 1
  set fitness igual ao fitness basal
  set coordenadas x e y de cada organismo como novos valores aleatórios
```

14.2.2. Avaliação dos Dados

O modelo não foi calibrado com nenhum dado. No geral, os dados disponíveis para a parametrização do modelo foram obtidos pela revisão de trabalhos relacionados.

Para a parametrização dos valores dos custos e benefícios foram avaliados diversos materiais: Nowak & Sigmund (1992), Axelrod (1997), McElreath & Boyd (2007), Wahl & Nowak (1999a), dentre outros. A priori não existe um mesmo par de valores adotados por todos os autores, mesmo porque a única condição que estes valores devem obedecer é que o valor do benefício (b) deve ser maior ao do custo (c) para possibilitar a evolução da cooperação. Mediante isto, infinitos pares de valores atenderiam este quesito. Logo, avaliamos que a escolha destes valores não constitui em fator impactante do modelo. No entanto, diferenças pequenas ou maiores entre o custo e benefício, juntamente com a fixação de outras variáveis de inicialização, poderiam implicar no processo de seleção ser mais forte ou mais fraco.

No entanto, optamos por parametrizar o valor de b em 4 e de c em 1, o mesmo usado por McElreath & Boyd (2007), para explorar diversas situações de equilíbrio envolvendo populações de ALLD, ALLC e/ou TFT. Acreditamos que esta escolha facilita a validação do modelo.

A definição dos valores para b e c também foi crucial para escolher a estratégia que representaria a família de LRS equilíbrio de Nash descrita em Wahl e Nowak (1999a). Os demais parâmetros desta estratégia foram escolhidos em obediência às três condições já

mencionadas (generosidade, otimismo e intransigência), juntamente com a análise das simulações, gráficos, equações e resultados apresentados em Wahl e Nowak (1999a). A ausência de trabalhos empíricos impossibilitou a adoção de outro critério de parametrização daquele mencionado anteriormente.

Os mesmos motivos anteriores também se aplicam a escolha dos parâmetros para a estratégia representativa da família RTS quanto da família RTSM. No caso da estratégia representativa RTS, optou-se por valores que pudessem conferir a esta estratégia um carácter mais prudencial em comparação a de estratégias mais generosas como o ALLC, TFT ou o LRS. Acreditamos que respostas que impliquem em investimentos iniciais pequenos juntamente com leves aumentos no investimento em resposta ao comportamento cooperativo do oponente acabe caracterizando melhor a ideia principal por trás do RTS que é a de ir “aumentando as apostas”.

A definição dos parâmetros da estratégia que pudesse representar a família RTSM acabou sendo uma mera consequência dos parâmetros escolhidos para as estratégias LRS e RTS, já que o investimento inicial de um RTSM deveria ser algo intermediário entre a generosidade do LRS e a prudência do RTS. Para todos os efeitos, consideraremos a estratégia RTSM uma estratégia prudente também.

A ideia de ter um processo de seleção mais fraca, menos dependente dos valores de custos e benefícios assim como da quantidade de rodadas e mais dependente do tipo de estratégia adotada pelo agente também direcionou a escolha de um valor grande de *fitness* basal de cada agente. Nas nossas simulações optou-se em usar o valor de 1.000.

Por fim, acreditamos que os critérios utilizados na escolha dos parâmetros procuram enviesar o mínimo possível os resultados obtidos pelas simulações.

14.2.3. Avaliação do Modelo Conceitual

Muito da avaliação conceitual do modelo se encontra subjacente nos capítulos anteriores e nas premissas de racionalidade que nos levaram a preferir basear a explicação na teoria dos jogos evolucionária a teoria clássica dos jogos. Veja principalmente o capítulo 3 e a seção atributos do modelo do protocolo ODD do capítulo 14 que corresponde ao item 14.2.1.4.

Esse tratamento e as hipóteses simplificadoras do modelo são as mesmas das principais pesquisas envolvendo simulação e o dilema do prisioneiro contínuo e iterado. A opção de não incluir nenhum elemento novo no modelo, seja uma regra de comportamento ou mesmo uma

maior complexidade dos agentes, vai ao encontro com principal objetivo do trabalho que é de conciliar os resultados obtidos por Wahl & Nowak (1999a) e Roberts e Sherrat (1998).

Além disso, a escolha tanto pela simplicidade dos agentes quanto das regras, é segundo Ormerod e Rosewell (2009) aspecto-chave para validação já que quanto mais simples forem as regras e os agentes, mais fácil torna-se testar o modelo e descobrir as suas implicações. Ainda segundo estes autores, a validação de modelos com agentes e regras complicadas é impossível com o nosso atual estado de conhecimento.

14.2.4. Verificação da Implementação

Nesta seção da ferramenta TRACE descreveremos todos os testes e as premissas adotadas para avaliar se o código do computador reproduz fielmente o modelo conceitual proposto.

O objetivo principal foi procurar exaustivamente qualquer erro de programação.

Os testes de verificação usados podem ser divididos em duas categorias: os básicos e aqueles um pouco mais complexos.

Alguns dos testes de consistência mais simples, ou os chamados básicos, compreenderam: verificar se o número de estratégias criadas está de acordo com os valores escolhidos pelo usuário, se ocorria aleatoriedade na formação das díades, a relação entre o valor do parâmetro w escolhido e a quantidade média de rodadas numa dada díade focal.

Ainda podemos citar: o cálculo correto das recompensas para cada uma das estratégias simuladas, a transição correta/esperada de geração a geração, enfim, todos os aspectos mais básicos do funcionamento do modelo.

Antes de descrever os testes de verificação de caráter mais complexos, será necessária uma breve exposição sobre o tamanho da população que foi utilizada nos experimentos.

Inicialmente procuramos trabalhar com populações grandes, e.g., 10.000 agentes, para assim, poder obter valores mais próximos daqueles fornecidos na literatura, e com isso, facilitar o processo de verificação do modelo.

Mas em virtude do enorme tempo de processamento exigido, acabamos desistindo de usar populações grandes.

Como o objetivo da simulação é de realizar uma exploração de uma forma bem geral do problema, decidimos utilizar uma população de 300 indivíduos em todos os demais experimentos desta pesquisa, inclusive nos demais testes de verificação.

Consideramos este tamanho adequado por poder gerar um resultado significativo, assim como proporcionar um tempo satisfatório na execução dos experimentos.

Corroborando com esta escolha, tem-se que Axelrod (2006), no seu primeiro torneio realizado em 1980, trabalhou com uma população finita de 200 agentes. Roberts e Sherratt (1998) nas suas simulações utilizaram uma população que variou entre 12 a 100 agentes.

Mesterton-Gibbons (1992) fornece uma maneira de dimensionar o tamanho de uma população para que a estratégia TFT possa ser uma EEE em relação a uma estratégia ALLD para o caso de jogo simultâneo e interação estática, i.e., os jogadores interagem com o mesmo oponente ao longo do jogo.

As condições necessárias obtidas algebricamente por Mesterton-Gibbons (1992) para que uma população de tamanho N de TFT seja estável em relação a ALLD são:

$$N > \frac{b - cw}{bw - c}, \text{ se } bw > c \text{ e } b > c > 0 \quad (77)$$

Se aplicarmos estas condições para valores de $b = 4$, $c = 1$ e $w = 0,5$, verificamos que o tamanho mínimo da população teria que ser de 4 agentes.

É importante enfatizar que mesmo que as condições derivadas por Mesterton-Gibbons (1992) não se refiram propriamente ao nosso problema de pesquisa, as mesmas servem para indicar a existência de um valor mínimo, mas não de um limitador máximo para o tamanho da população em jogos envolvendo populações finitas e interação estática.

Com o tamanho da população fixado, avaliações mais complexas procuraram comparar os resultados fornecidos pelo modelo de simulação com aquelas decorrentes de situações clássicas de invasibilidade numa população grande, resultados estes muito bem descritos em Maynard Smith (1982) e em McElreath e Boyd (2007).

Outros resultados foram derivados por nós através da construção das funções de recompensa das estratégias envolvidas sob a condição de invasibilidade. O passo a passo de cada dedução pode ser visto no apêndice C.

Para determinar o valor mínimo fornecido pelo modelo para cada situação mostrada no quadro 16, procedeu-se sempre da seguinte maneira: variou-se a frequência procurada entre 0 a 100% com incrementos de 1%.

Consideramos como sendo o valor mínimo atribuído pelo modelo quando ocorresse o caso de sucesso.

Ainda do quadro 16, as equações correspondentes das situações 1 e 3 se encontram em McElreath e Boyd (2007), enquanto que as demais se encontram deduzidas no apêndice C.

Por fim, enfatizamos que testamos o modelo apenas para algumas situações, havendo muitas outras que não se encontra contempladas no quadro abaixo. Entendemos que os casos selecionados já sejam suficientes para conferir uma boa confiabilidade ao modelo.

O quadro 16 mostra os resultados destes testes. Foi utilizado tamanho da população $N = 300$; $b = 4$; $c = 1$ e $w = 0,5$.

<i>Situação</i>	<i>Equação correspondente</i>	<i>Valor mínimo calculado pela equação matemática ($b = 4$; $c = 1$ e $w = 0,5$)</i>	<i>Valor mínimo fornecido pelo modelo de simulação</i>
1 - Frequência mínima de TFT que permita uma população de TFT invadir uma população de ALLD (jogo simultâneo)	$p = \frac{c(1-w)}{(b-c)w}$	$p = 33,33\%$	$p = 35,00\%$
2 - Frequência mínima de TFT que permita uma população de TFT invadir uma população de ALLD (jogo alternado)	$p = \frac{c(1-w)}{(b-c)(1+w)}$	$p = 11,11\%$	$p = 13,67\%$
3 - Frequência mínima de ALLC que permite que um mutante ALLD invada uma população de ALLC e TFT (jogo simultâneo)	$p = 1 - \frac{c}{wb}$	$p = 50,00\%$	$p = 67,57\%$
4 - Frequência mínima de ALLC que permite que um mutante ALLD invada uma população de ALLC e TFT (jogo alternado)	$p = \frac{b-2c+bw}{b(1+w)}$	$p = 66,67\%$	$p = 88,33\%$
5 - w mínimo para que a estratégia LRS* possa "predominar" numa população com 50% LRS equilíbrio de Nash e 50% de ALLD (jogo simultâneo)	$w = \frac{2c}{bp - cp + c}$	$w = 80,00\%$	$w = 76,00\%$
6 - w mínimo para que a estratégia LRS* possa "predominar" numa população com 50% LRS equilíbrio de Nash e 50% de ALLD (jogo alternado)	$w = \frac{3c + cp - bp}{bp - cp + c}$	$w = 60,00\%$	$w = 58,00\%$

Quadro 16 – Resultados de testes de verificação feita no modelo com base em situações de invasibilidade (elaborado pelo próprio autor)

Ao comparar os valores preditos pelo modelo matemático com aquelas determinadas pela simulação, percebe-se que dentre as seis situações analisadas, quatro delas, a saber, as situações 1, 2, 5 e 6 tiveram valores bem próximos.

Diferenças maiores foram detectadas apenas nas situações 3 e 4. A existência dessas discrepâncias fez colocar o modelo em dúvida, levando ao questionamento da correta implementação computacional das regras pré-programadas para as estratégias ou da dinâmica evolucionária.

Ao avaliarmos a evolução ao longo das várias gerações das estratégias das situações 3 e 4, podemos entender os valores determinados pelo modelo e verificar que código do modelo no NetLogo reproduz fielmente o modelo conceitual proposto.

Para explicar isto melhor, vamos focar nos resultados obtidos na situação 3.

Nela determinamos que a frequência mínima de ALLC para que um mutante ALLD possa invadir uma população polimórfica de ALLC e TFT num jogo simultâneo é de 67,57%.

Na figura 16 é possível verificar como se deu a evolução de cada uma dessas estratégias ao longo do tempo numa condição de invasão da estratégia rara ALLD. Para isso os valores de iniciação escolhidos para a simulação foram basicamente: uma população com 301 agentes, dos quais 96 ou 31,89% eram de TFTs, 204 ou 67,77% de ALLCs e um único mutante ALLD ou 0,33% da população total. Os valores atribuídos para b , c e w foram, respectivamente, 4, 1 e 0,5.

Observando as curvas do gráfico da figura 16, tem-se que ao longo do tempo, a quantidade da estratégia ALLD cresceu às custas da estratégia ALLC, i.e., a seleção, ao longo do tempo, foi trocando cada agente ALLC por um outro ALLD. É importante mencionar que nesta condição de invasibilidade do raro ALLD, a estratégia ALLC sempre terá um *fitness* médio inferior ao do TFT e, por conta disso, é possível observar uma curva descendente para ALLC, enquanto nota-se pouca alteração do número de TFTs ao longo da simulação.

Resumindo, a questão da invasibilidade se inicia de fato com a extinção da estratégia ALLC e a competição da estratégia ALLD com a TFT.

Perceba que neste ponto recaímos na mesma análise feita na situação 1, i.e., determinar qual é a frequência mínima de TFT que possibilitaria uma estratégia deste tipo prosperar frente a uma população de ALLD e TFT num jogo do tipo simultâneo.

Se observamos na figura 16 a composição populacional imediatamente após a extinção da estratégia ALLC, tem-se que dos 301 agentes, 196 ou 65,12% são do tipo ALLD, enquanto, 105 ou 34,88% são do tipo TFT. Observe que esta frequência de TFT é muito próxima àquela já determinada pela simulação na situação 1 (35,00%).

A mesma análise feita entre as situações 3 e 1 também poderia ser feita para as situações 4 e 2. Assim, mesmo com as diferenças observadas, pode-se constatar a existência de uma coerência lógica entre os resultados das situações 3 com 1 e de 4 com 2.

Tudo isso apenas serve para indicar que o código computacional conseguiu traduzir perfeitamente as regras subjacentes ao modelo conceitual.

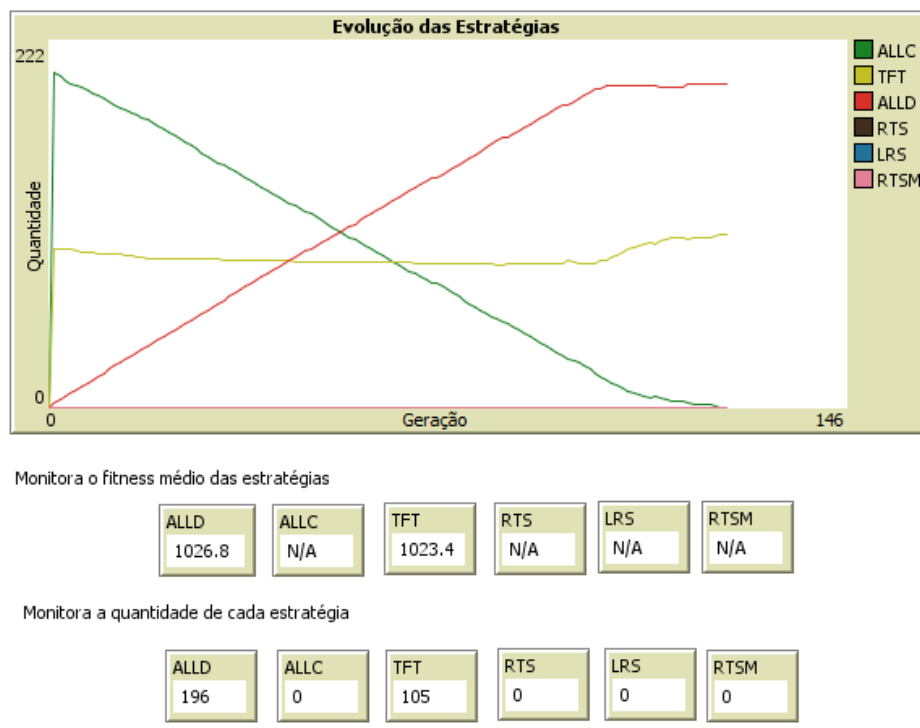


Figura 16 – Evolução das estratégias ALLC, ALLD e TFT num jogo simultâneo (elaborado pelo próprio autor)

Apesar de termos conseguido relacionar de uma forma adequada os resultados gerados pelo modelo e assim ter avançado mais na sua verificação. Ainda resta explicar as diferenças observadas entre os valores obtidos pela simulação e pelas equações.

Uma das suposições cruciais de uma modelagem baseada em equações é considerar uma população com um número de agentes muito grande, algo que é violada pela simulação.

Neste ponto os modelos populacionais baseados em equações tratariam as populações como sendo quantidades contínuas enquanto que as populações são de fato quantidade discretas (Wilensky & Rand, 2015). E.g., uma população de lobos se extinguiria com menos do que dois indivíduos, sendo um macho e uma fêmea; na realidade, “um milionésimo de lobo não poderia existir e certamente nem se reproduzir, mas ele poderia resultar num aumento da população de lobos num modelo baseado em equações”, segundo Wilensky e Rand (2015, p. 32). E.g., quando nos referimos a 0,318% de uma população com 10.000 organismos, estaríamos falando de 31,8 indivíduos; algo impossível de se conceber no mundo real, mas totalmente factível numa modelagem baseada em equações.

Este descasamento entre a natureza contínua dos modelos baseado em equações e a natureza discreta do mundo real causa o problema do “nano-lobo” (Wilson, 1998).

Visando contornar este problema do “nano-lobo” é que nos deparamos geralmente com a suposição de população grande nos modelos baseados em equações.

A violação desta condição populacional é uma das responsáveis pelas discrepâncias entre a simulação e os modelos analíticos determinísticos (Wilson, 1998).

Assim, as diferenças observadas no quadro 16 podem ser explicadas por estarmos utilizando uma população finita aliada a uma seleção de natureza discreta sobre as populações.

Outros motivos poderiam ser: efeitos espaciais e estocasticidade das interações entre indivíduos (Wilensky & Rand, 2015; Wilson, 1998; Parunak et al., 1998).

15. RECONCILIANDO OS MODELOS NÃO ESPACIAIS COM INVESTIMENTO VARIÁVEL POR MEIO DA SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTE E SEM A PRESENÇA DE RUÍDO

15.1 Simulando torneios (todos contra todos) com jogadas simultâneas e sem a presença de ruído

Inicialmente apresentamos na tabela 11 as aptidões médias e os seus respectivos desvios-padrão da estratégia focal linha ao interagir com a estratégia coluna para um dilema do prisioneiro contínuo e iterado sem a presença de ruído e com jogadas simultâneas.

A tabela 11 foi montada utilizando $b = 4$, $c = 1$, $fitness$ basal = 1000 e $w = 0,5$. Foram simuladas 1000 gerações tendo em cada geração 100 rodadas para uma população composta de uma única díade.

Os objetivos desta tabela são de dar uma ideia do desempenho relativo de cada estratégia frente às demais e também de contribuir no processo de verificação do modelo.

As aptidões médias em cada linha se encontram dispostas em ordem decrescente, e.g., o jogador focal linha ALLC obtém a maior aptidão média com outro ALLC e a menor com a estratégia ALLD.

Perceba que esta disposição é condizente com o *modus operandi* de cada uma das estratégias já apresentadas, i.e., as maiores aptidões médias se encontram associadas com estratégias generosas, como ALLC, LRS e TFT, enquanto que as menores aptidões, respectivamente, com as estratégias prudentes, como o RTS e RTSM, seguida pela estratégia que não coopera, ALLD.

Ainda da tabela 11, observe que as estratégias ALLC, LRS e TFT são idênticas quando elas interagem entre si, e que estas três estratégias podem ser potencialmente exploradas por estratégias como o RTSM, RTS e o ALLD.

Perceba que a característica de otimismo da estratégia LRS em comparação com a estratégia TFT a faz obter uma maior aptidão média frente a estratégias prudentes como RTS e RTSM, mas implica em maiores perdas frente a estratégia não cooperativa ALLD.

		Jogador Coluna					
		ALLC	LRS	TFT	RTSM	RTS	ALLD
Jogador Linha	ALLC	1300,00 ±0	1300,00 ±0	1300,00 ±0	1199,10 ±10,02	1015,00 ±16,19	900,00 ±0
	LRS	1300,00 ±0	1300,00 ±0	1300,00 ±0	1192,24 ±8,48	1032,26 ±15,19	925,02 ±2,45
	TFT	1300,00 ±0	1300,00 ±0	1300,00 ±0	1182,81 ±7,0	1007,79 ±6,10	949,78 ±4,99
	RTSM	1325,48 ±2,53	1300,31 ±3,62	1267,66 ±7,02	1150,00 ±0	1032,98 ±3,55	974,96 ±2,55
	RTS	1371,29 ±4,03	1300,41 ±6,86	1218,21 ±16,43	1117,40 ±6,26	1058,97 ±6,86	993,18 ±1,15
	ALLD	1400,00 ±0	1300,98 ±9,73	1200,88 ±19,94	1101,11 ±10,20	1026,77 ±1,15	1000,00 ±0

Tabela 11 – Aptidão média e desvio-padrão do jogador focal linha interagindo com o jogador coluna para valores de $b = 4$, $c = 1$, $w = 0,5$ e fitness basal = 1000 em 1000 gerações com 100 rodadas por geração num jogo simultâneo e sem ruído.

Para a construção dos torneios, utilizamos um total de 300 agentes, sendo 50 referentes a cada uma das seis estratégias representativas (ALLC, ALLD, TFT, LRS, RTS e RTSM).

Todos os agentes foram dotados de um *fitness* basal de 1000.

Os valores de b e c , benefício e custo, foram mantidos em 4 e 1, respectivamente.

Ao longo da simulação variamos o parâmetro w entre 0 e 0,95, com incrementos de 0,05, sendo que para cada valor de w foram realizados 25 experimentos ou torneios.

O experimento terminava após 2.500 gerações ou se num dado instante restasse uma única estratégia.

Na figura 17 apresentamos a evolução da frequência de cada estratégia em função dos valores de w . Perceba que podemos identificar cinco fases no gráfico da figura 17:

- w entre 0 e 0,25 : a estratégia ALLD é a vencedora do torneio e as outras cinco estratégias são extintas;
- w entre 0,30 e 0,40 : a estratégia RTS começa a obter uma aptidão média superior às outras cinco estratégias. Quando w é igual a 0,40, esta estratégia é a vencedora já as outras estratégias são extintas;
- w entre 0,45 e 0,60 : o aumento do valor de w começa a favorecer as estratégias generosas, como ALLC, TFT e LRS. Para valores de w nesta faixa é possível observar ao final da simulação a coexistência de algumas das cinco estratégias, com exceção da estratégia ALLD;

- w entre 0,65 e 0,90 : um valor grande de w tende agora a favorecer estratégias mais generosas, conseqüentemente, observa-se ao final dos torneios apenas as presenças das estratégias LRS, TFT e ALLC.
- w igual a 0,95: a única vencedora dos torneios para um valor extremamente alto de w foi a estratégia TFT.

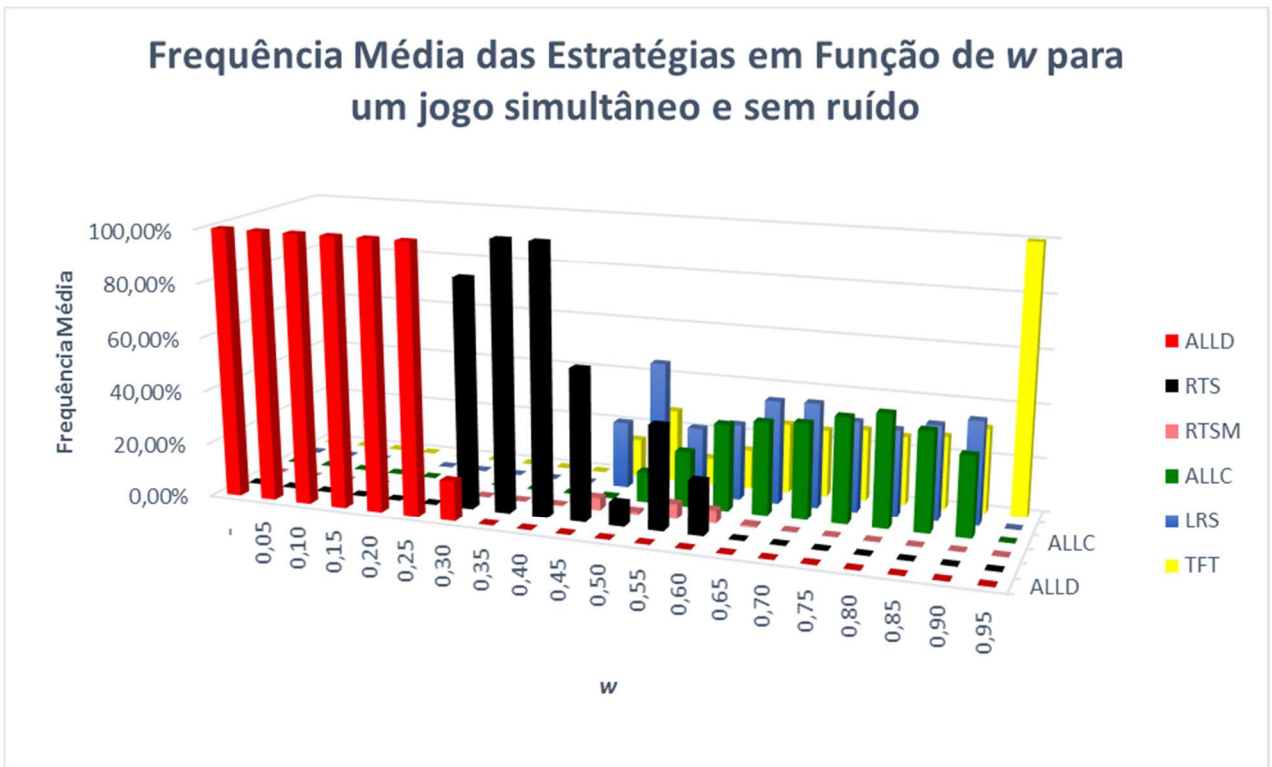


Figura 17 – Evolução das frequências médias de cada estratégia em função de w para um jogo simultâneo e sem ruído

Abaixo são apresentadas as frequências médias e os seus respectivos desvios-padrão para cada estratégia do nosso torneio em função dos valores de w utilizados nas simulações. Os valores da tabela 12 complementam as da figura 17.

w	FREQUÊNCIA MÉDIA ACOMPANHADA DO SEU DESVIO-PADRÃO (para cada valor de w foram realizados 25 experimentos)					
	TFT	LRS	ALLC	ALLD	RTS	RTSM
0 a 0,25	0% ±0%	0% ±0%	0% ±0%	100% ±0%	0% ±0%	0% ±0%
0,30 a 0,40	0% ±0%	0% ±0%	0% ±0%	4,94% ±15,59%	95,06% ±15,59%	0% ±0
0,45 a 0,60	16,07% ±17,87%	31,77% ±25,76%	16,49% ±18,27%	0% ±0%	31,63% ±46,74%	4,04% ±12%
0,65 a 0,90	27,12% ±10,03%	36,26% ±11,88%	36,52% ±11,86%	0% ±0%	0% ±0%	0,10% ±1,22%
0,95	100% ±0	0% ±0%	0% ±0%	0% ±0%	0% ±0%	0% ±0%

Tabela 12 – Frequência média de cada estratégia acompanhada do seu respectivo desvio-padrão para valores escolhidos de w

Vamos passar a analisar a evolução das estratégias para cada uma das cinco fases identificadas. Para isso, escolheremos para cada fase um valor representativo para o parâmetro w , e apresentaremos como se deu a evolução de cada estratégia até o término da simulação.

a) 1ª Fase: Valor de w igual a 0,10

A figura 18 mostra como as estratégias evoluíram para um valor de $w = 0,1$.

Pode-se observar que a estratégia ALLD é a grande vencedora. Nota-se que as primeiras estratégias que vão sendo extintas são justamente as mais generosas (ALLC, TFT e LRS), seguida pela estratégia RTSM, e por fim, a estratégia RTS.

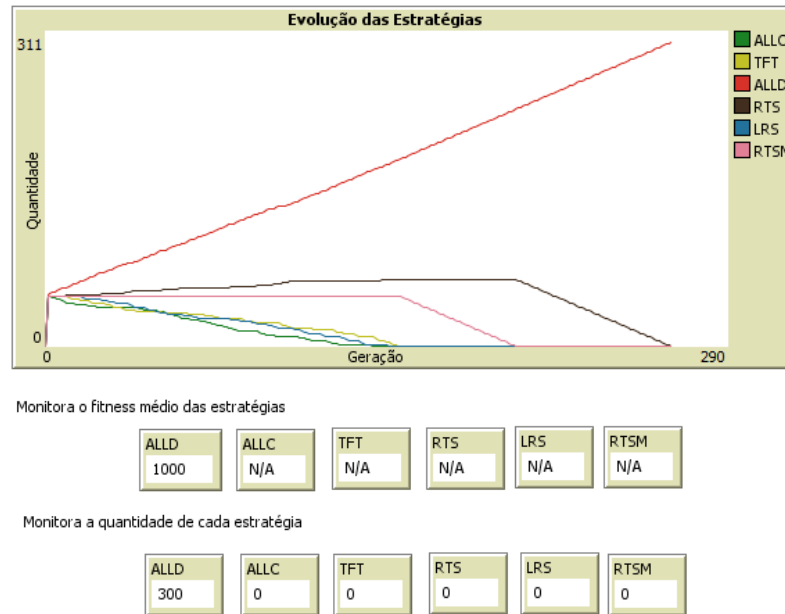


Figura 18 – Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas e sem a presença de ruído com $w = 0,10$ (elaborado pelo próprio autor)

Outro ponto que chama atenção na figura 18 é que, excetuando ALLD, nenhuma outra estratégia esboçou crescimento. Observe que o declínio da estratégia RTS inicia-se no mesmo momento da extinção da estratégia RTSM, enquanto que o declínio da estratégia RTSM por sua vez dá-se praticamente no momento da extinção das outras três estratégias mais generosas ($x_0 = 1$).

De uma certa forma observamos uma “exploração” em cadeia, onde as estratégias que possuem um valor de x_0 menor exploraram as estratégias com um valor de x_0 maior, resultando talvez na sequência de extinção observada.

b) 2ª Fase: Valor de w igual a 0,30

Quando aumentamos um pouco o valor de w , passamos a favorecer ganhos em decorrência de iterações um pouco mais duradouras.

Este aumento ainda é insuficiente para possibilitar o aumento da frequência de estratégias mais generosas como o ALLC, TFT e LRS. Mas é o suficiente para que a estratégia RTS possa colher os ganhos da cooperação com as outras estratégias e com ela mesma, e semelhante ao ALLD, possa crescer em números de agentes na população.

No início das simulações observamos, uma queda gradativa das estratégias mais generosas como o ALLC, TFT e LRS e um aumento gradativo da estratégia ALLD juntamente a estratégia RTS. A frequência da estratégia RTSM se manteve estável até a extinção das estratégias mais generosas, tendo uma gradativa queda após isso.

Notamos também que o aumento da frequência da estratégia RTS sobre a estratégia ALLD ocorre algumas gerações após a extinção da estratégia RTSM.

Todos estes pontos mencionados podem ser observados na figura 19.

Ainda na figura 19 chamamos a atenção sobre um aspecto muito comum em modelos do tipo ABM que é a presença do ponto de inflexão ou *tipping point*.

Observe que até 290 gerações se estabelece um equilíbrio instável entre agentes das estratégias ALLD e RTS.

Por conta da dinâmica evolutiva e dos efeitos estocásticos, pequenos desvios começam a afetar a frequência destas duas populações.

O que chama a atenção é que isso vai ocorrendo até se atingir o ponto de inflexão. A partir daí, observa-se um aumento muito grande na velocidade de alteração das frequências dessas duas populações.

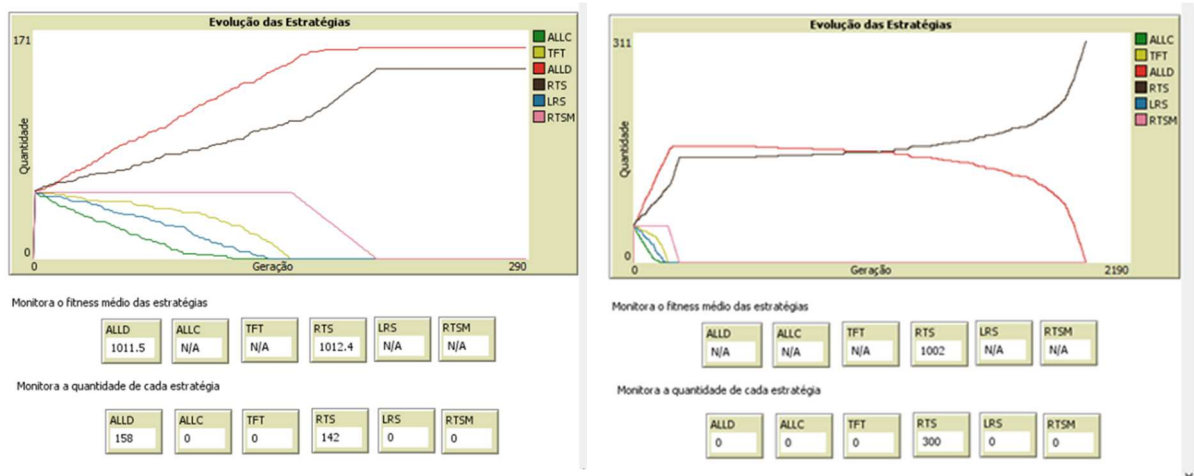


Figura 19 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas e sem a presença de ruído com $w = 0,30$, respectivamente, até 290 (esquerda) e 2100 (direita) gerações (elaborado pelo próprio autor)

c) 3ª Fase: Valor de w igual a 0,55

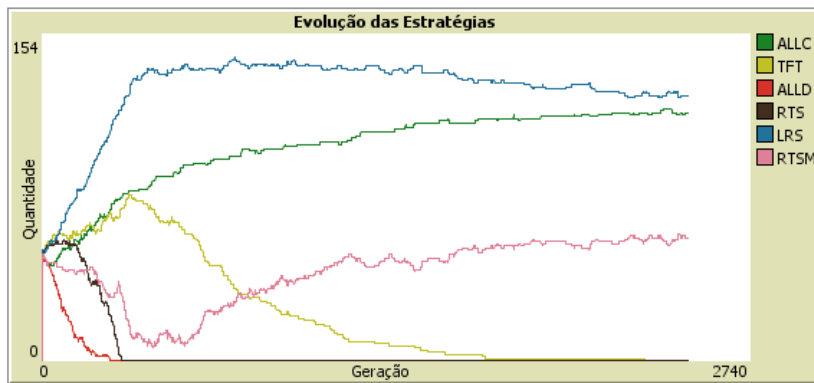
Com um valor de w igual a 0,55, estratégias mais generosas tendem a ter mais destaque no nosso torneio. Na figura 20 apresentamos um dos possíveis resultados gerados quando o valor de w igual a 0,55.

Inicialmente observa-se a extinção da estratégia não cooperativa ALLD seguida pela estratégia RTS.

Uma queda da frequência é observada também na estratégia RTSM. Ela cai até um certo limite e se estabiliza. Após algumas gerações, esta estratégia começa a aumentar de frequência em detrimento de diminuições de frequências observadas nas estratégias LRS e TFT. Esta última é a que apresenta a maior queda.

É possível que o crescimento da estratégia RTSM vá ocorrendo com a exploração das estratégias mais generosas como o ALLC, LRS e TFT.

Ao final das 2500 gerações, pode-se observar que das seis estratégias iniciais, apenas a estratégia ALLC. LRS e RTSM não foram extintas.



Monitora o fitness médio das estratégias

ALLD	ALLC	TFT	RTS	LRS	RTSM
N/A	1000	N/A	N/A	1000	1000

Monitora a quantidade de cada estratégia

ALLD	ALLC	TFT	RTS	LRS	RTSM
0	117	0	0	125	58

Figura 20 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas e sem a presença de ruído com $w = 0,55$ após 2500 gerações (elaborado pelo próprio autor)

d) 4ª Fase: Valor de w igual a 0,80

Com valores maiores de w , estratégias mais generosas passam a se destacar como as grandes vencedoras.

Para analisar a evolução das estratégias nesta 4ª fase vamos tomar como referência um valor de $w = 0,8$.

É possível observar na figura 21 que as duas estratégias que mostram os maiores crescimentos são o LRS e o ALLC. Apesar da estratégia ALLC se constituir na estratégia mais ingênua e ser bastante passível a exploração, o efeito do aumento do w ou do número médio das iterações entre as díades acaba gerando uma compensação frente a exploração da estratégia ALLD, e talvez seja isso que possibilite o aumento da sua frequência.

As extinções das estratégias ALLD, RTS e RTSM ocorrem rapidamente. Após 231 gerações, as três vencedoras do nosso torneio são as estratégias generosas ALLC, TFT e LRS.

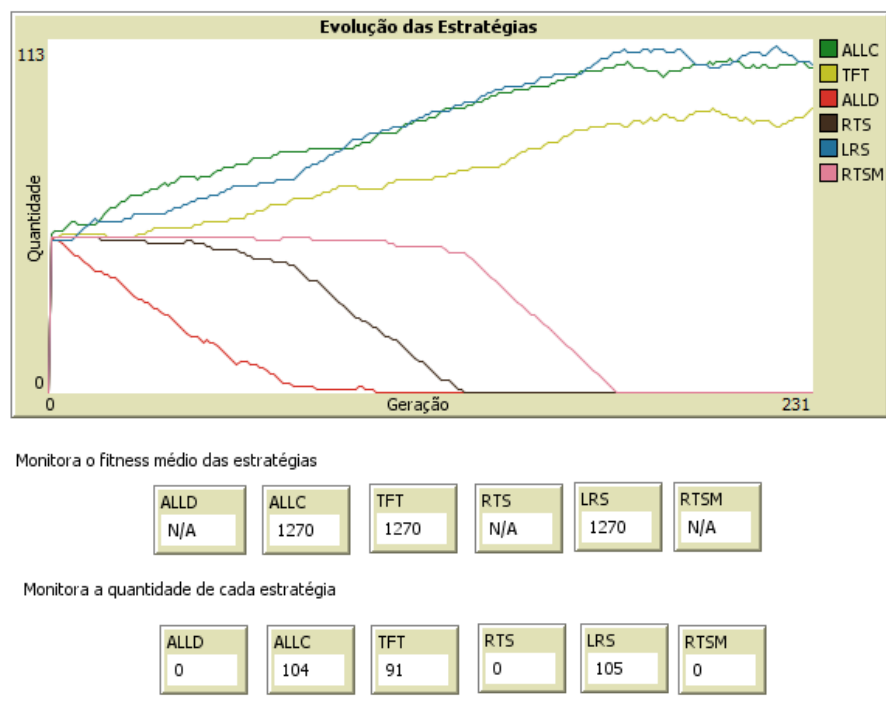


Figura 21 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas e sem a presença de ruído com $w = 0,80$ (elaborado pelo próprio autor)

e) 5ª Fase: Valor de w igual a 0,95

Algo interessante ocorre quando aumentamos em demasia o valor de w .

A figura 22 mostra a evolução das estratégias quando w é igual a 0,95. Em todas as 25 simulações feitas para este valor de w , tivemos como o único vencedor a estratégia TFT.

Este resultado é no mínimo curioso considerando a tendência observada na evolução das estratégias na 4ª fase. Seria de se esperar que quanto maior fosse o valor de w , maior seria a adaptabilidade média das estratégias generosas.

Ao observarmos o gráfico da figura 22, podemos entender o processo subjacente ao resultado da simulação para este valor de w . Nela mostramos o torneio em dois momentos do tempo. Num primeiro momento, pode-se observar a queda das estratégias ALLC e LRS até a sua extinção, e em contrapartida, o aumento da estratégia ALLD.

O aumento do valor de w acarreta um número médio maior de rodadas entre uma dada díade.

Se a díade for formada por cooperadores, isso será ótimo para os dois jogadores, pois ambos poderão colher por mais tempo os benefícios da cooperação. Mas, se a díade for

composta por um cooperador e um não cooperador, pior será para a estratégia cooperativa, já que será explorada por um número maior de rodadas pela estratégia não cooperativa.

Talvez este tenha sido o motivo da extinção das estratégias ALLC e LRS e do crescimento da estratégia ALLD.

Além disso, diferente das estratégias ALLC e LRS que tentam obter a cooperação do seu oponente após uma não cooperação; mesmo mediante investimentos pequenos por parte da estratégia LRS. A estratégia TFT não volta a cooperar a não ser que o oponente coopere novamente. Talvez seja isto que tenha mantido esta estratégia viva no torneio e levado à extinção as duas primeiras estratégias.

O resultado final deste torneio pode ser observado na figura 22. Após a extinção das estratégias ALLC, LRS e RTS, pode-se observar uma queda lenta das estratégias RTSM e ALLD e um crescimento consistente da estratégia TFT. Próxima da 800ª geração, é formada um ponto de inflexão da estratégia ALLD e RTSM levando-as a extinção.

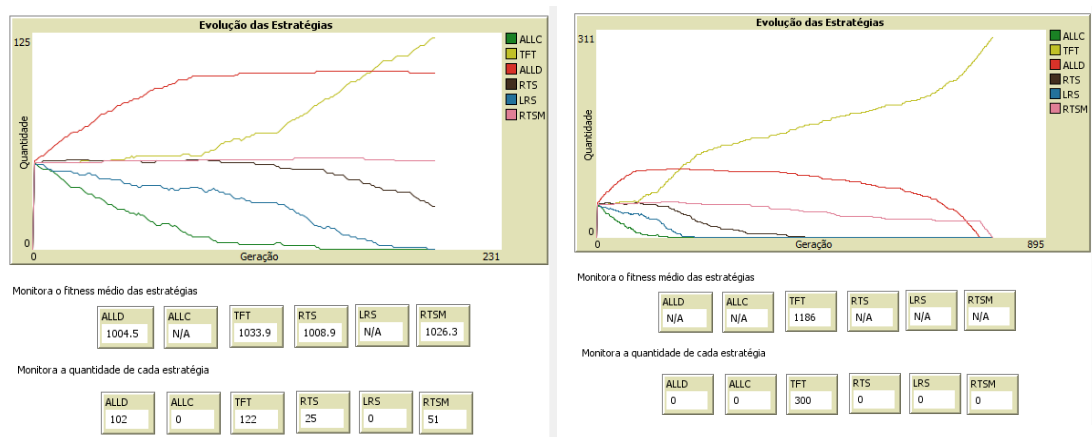


Figura 22 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas e sem a presença de ruído com $w = 0,95$, respectivamente, até aprox. 200 (esquerda) e 820 (direita) gerações (elaborado pelo próprio autor)

15.2 Simulando torneios (todos contra todos) com jogadas alternadas e sem a presença de ruído

Seguiremos um roteiro semelhante de análise ao da seção anterior. Da mesma forma que no jogo simultâneo, construímos a tabela 13 que apresenta as aptidões médias e os seus respectivos desvios-padrão da estratégia focal linha ao interagir com a estratégia coluna para um dilema do prisioneiro contínuo e iterado sem ruído e com as jogadas alternadas.

Os mesmos valores para os parâmetros b , c , $fitness$ basal e w foram utilizadas aqui: $b=4$, $c=1$, $fitness$ basal = 1000 e $w = 0,5$. Simulamos 1000 gerações tendo em cada geração 100 rodadas.

Sendo novamente a população composta de uma única díade. Uma estratégia escolhida pelo jogador coluna, e outra, pelo jogador linha.

		Jogador Coluna					
		ALLC	LRS	TFT	RTSM	RTS	ALLD
Jogador Linha	ALLC	1300,00 ±0	1300,00 ±0	1300,00 ±0	1249,29 ±8,41	1054,79 ±16,25	900,00 ±0
	LRS	1300,00 ±0	1300,00 ±0	1300,00 ±0	1238,77 ±6,69	1078,46 ±14,08	937,68 ±2,26
	TFT	1300,00 ±0	1300,00 ±0	1300,00 ±0	1225,34 ±4,37	1042,29 ±2,19	974,81 ±4,51
	RTSM	1312,93 ±2,14	1274,89 ±1,74	1225,34 ±4,37	1150,00 ±0	1054,91 ±1,36	987,57 ±2,24
	RTS	1361,32 ±4,07	1255,08 ±5,23	1131,27 ±13,37	1080,27 ±5,23	1074,23 ±7,12	994,97 ±0,31
	ALLD	1400,00 ±0	1250,31 ±8,98	1100,76 ±18,05	1050,77 ±8,84	1020,00 ±1,23	1000,00 ±0

Tabela 13 – Aptidão média e desvio-padrão do jogador focal linha interagindo com o jogador coluna para valores de $b = 4$, $c = 1$, $w = 0,5$ e $fitness$ basal = 1000 em 1000 gerações com 100 rodadas por geração num jogo alternado e sem ruído.

Tomando a tabela 11 como referência e a comparando com a tabela 13 construímos a tabela 14. Esta tabela apresenta a variação percentual da aptidão média de um jogo em relação a outro para cada estratégia do jogador linha.

	ALLC	LRS	TFT	RTSM	RTS	ALLD
ALLC	0,00%	0,00%	0,00%	4,19%	3,92%	0,00%
LRS	0,00%	0,00%	0,00%	3,90%	4,48%	1,37%
TFT	0,00%	0,00%	0,00%	3,60%	3,42%	2,64%
RTSM	-0,95%	-1,95%	-3,34%	0,00%	2,12%	1,29%
RTS	-0,73%	-3,49%	-7,14%	-3,32%	1,44%	0,18%
ALLD	0,00%	-3,89%	-8,34%	-4,57%	-0,66%	0,00%

Tabela 14 - Variação percentual da aptidão média do jogador focal linha de um jogo simultâneo e sem ruído para um jogo alternado e sem ruído

Algumas caselas da tabela 14 encontram-se hachuradas. O fundo verde indica um aumento, enquanto o vermelho, uma diminuição da aptidão média em decorrência da alteração do jogo.

As caselas hachuradas de verde na tabela 14 indicam que as estratégias mais beneficiadas quando alteramos a forma de jogo, i.e., jogo simultâneo e sem ruído para o jogo alternado e sem ruído, são justamente as estratégias generosas como ALLC, TFT e LRS. Dentre estas três, a mais beneficiada é a LRS quando interage com a estratégia RTS com um aumento percentual da aptidão média de 4,48%.

As maiores perdas, i.e, caselas com sombreado em vermelho, encontram-se associadas com as estratégias prudentes RTS e RTSM, mas principalmente com a estratégia ALLD. A maior perda de aptidão média, -8,34%, ocorre quando a estratégia ALLD interage com a estratégia TFT.

Quando comparamos os ganhos médios das estratégias generosas com as perdas médias sofridas pela estratégia não cooperativa ALLD, fica claro que o jogo alternado tende a favorecer a cooperação em comparação com o jogo simultâneo para os mesmos cenários simulados.

Após esta análise inicial, descreveremos os torneios simulados.

Novamente utilizamos um total de 300 agentes, sendo 50 referentes a cada uma das seis estratégias representativas (ALLC, ALLD, TFT, LRS, RTS e RTSM).

Todos os agentes foram dotados de um fitness basal de 1000.

Os valores de b e c , benefício e custo, foram mantidos em 4 e 1, respectivamente.

Ao longo da simulação variamos o parâmetro w entre 0 e 0,95, com incrementos de 0,05, onde para cada valor de w foram realizados 25 experimentos ou torneios.

O experimento terminava após 2.500 gerações ou se num dado instante restasse uma única estratégia.

Na figura 23 apresentamos a evolução da frequência de cada estratégia em função dos valores de w .

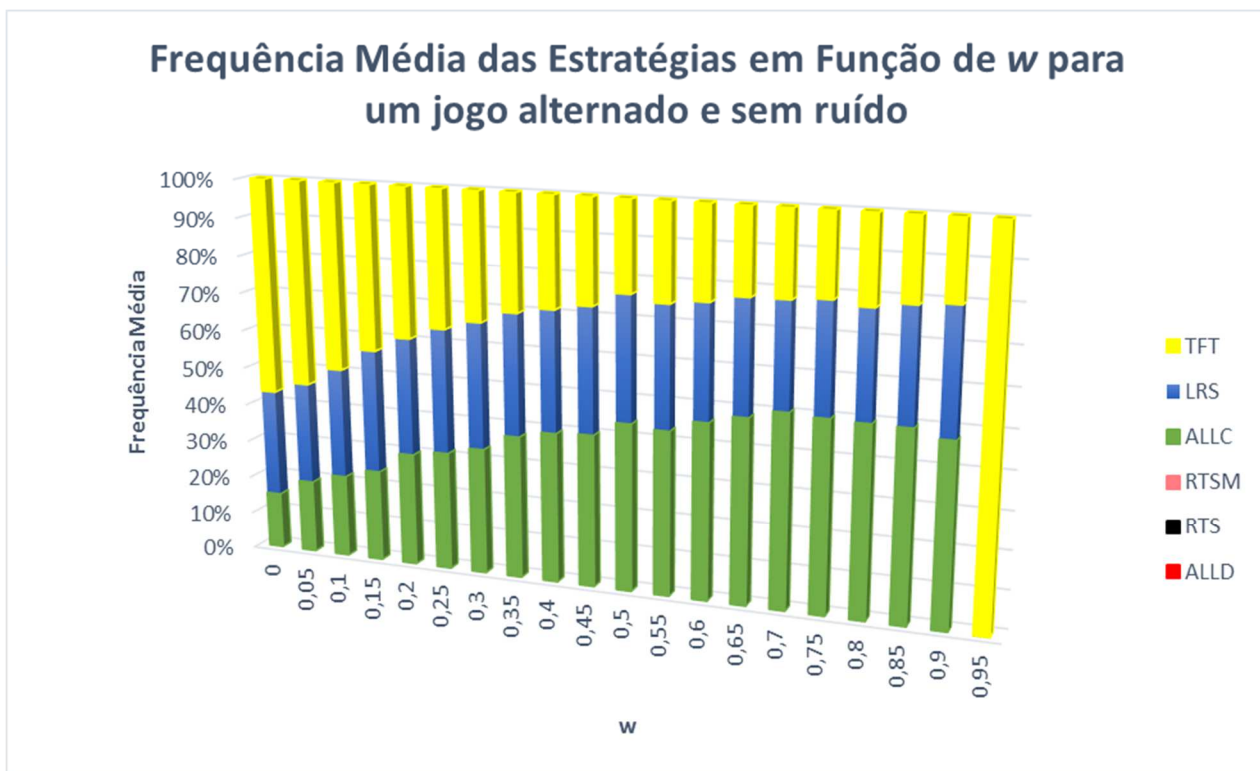


Figura 23 - Evolução das frequências médias de cada estratégia em função de w para um jogo alternado e sem ruído

De acordo com análise prévia, houve um forte predomínio das estratégias generosas ALLC, TFT e LRS. Mesmo assim, foi possível identificar três momentos no gráfico da figura 23:

- w entre 0 e 0,30: a estratégia TFT possui a maior frequência na população, seguida pela estratégia LRS e ALLC. As demais estratégias são extintas;
- w entre 0,35 e 0,90: a estratégia ALLC possui a maior frequência na população, seguida pela estratégia LRS e TFT. As demais estratégias são extintas;
- w igual a 0,95: praticamente a única vencedora dos torneios para um valor extremamente alto de w foi a estratégia TFT. Das 25 simulações realizadas, em apenas uma observou-se uma população formada pelas estratégias TFT e LRS, sendo as frequências, respectivamente, 99,33% e 0,67%.

Abaixo são apresentadas as frequências médias e os seus respectivos desvios-padrão para cada estratégia do nosso torneio em função dos valores de w utilizados nas simulações. Os valores da tabela 15 complementam as da figura 23.

w	FREQUÊNCIA MÉDIA ACOMPANHADA DO SEU DESVIO-PADRÃO (para cada valor de w foram realizados 25 experimentos)					
	TFT	LRS	ALLC	ALLD	RTS	RTSM
0 a 0,30	44,48% \pm 9,62%	30,36% \pm 5,23%	25,16% \pm 7,53%	0% \pm 0%	0% \pm 0%	0% \pm 0%
0,35 a 0,90	23,99% \pm 5,05%	30,38% \pm 4,91%	45,63% \pm 6,33%	0% \pm 0%	0% \pm 0%	0% \pm 0%
0,95	99,97% \pm 0,13%	0,03% \pm 0,13%	0% \pm 0%	0% \pm 0%	0% \pm 0%	0% \pm 0%

Tabela 15 – Frequência média de cada estratégia acompanhada do seu respectivo desvio-padrão para valores escolhidos de w

Vamos passar a analisar a dinâmica evolucionária para cada uma das três fases identificadas. Para isso, escolheremos para cada fase um valor representativo para o parâmetro w , e apresentaremos como se deu a evolução de cada estratégia até o término da simulação.

a) 1ª fase: $w = 0$

Neste primeiro caso, figura 24 (direita), observou-se uma extinção bem rápida das estratégias ALLD e RTS, seguida pela estratégia RTSM. A única estratégia que obteve um aumento expressivo foi a estratégia TFT, um ligeiro aumento foi observado na estratégia LRS e uma leve diminuição da frequência na estratégia ALLC.

No início da simulação já é possível observar a diminuição da frequência das estratégias ALLD e RTS. Somente após a extinção destas duas é que se começa a observar o decréscimo da estratégia RTSM.

Na figura 24 ainda é possível observar um enorme contraste do caso simultâneo (esquerda) e alternado (direita) para $w=0$.

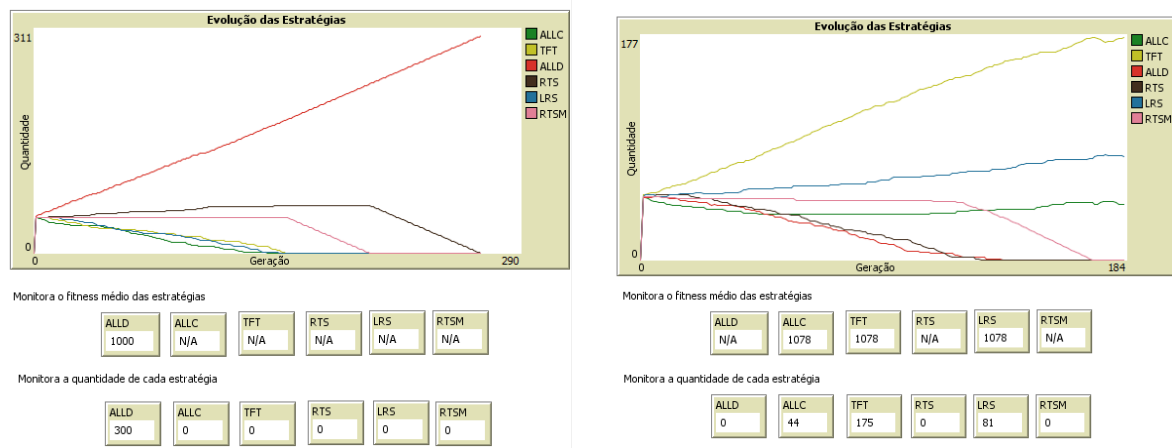


Figura 24 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas (esquerda) e com Jogadas Alternadas (direita) e sem a presença de ruído com $w = 0$ (elaborado pelo próprio autor)

Como já dito anteriormente, com base nos resultados obtidos até aqui, é possível inferir que a alteração do jogo de simultâneo para alternado tendeu a favorecer as estratégias cooperativas generosas.

Ao inserirmos no jogo a ideia de ordem de jogada, estamos possibilitando que um dos jogadores, no caso o segundo jogador, obtenha uma vantagem informacional sobre o seu oponente na primeira rodada.

Esta vantagem informacional é semelhante ao pequeno investimento feito pela estratégia RTS ao “testar o terreno” antes de elevar as suas apostas na relação, mas ao contrário do RTS, esta vantagem é obtida a custo zero, é claro, contanto que o nosso jogador focal seja o segundo a jogar.

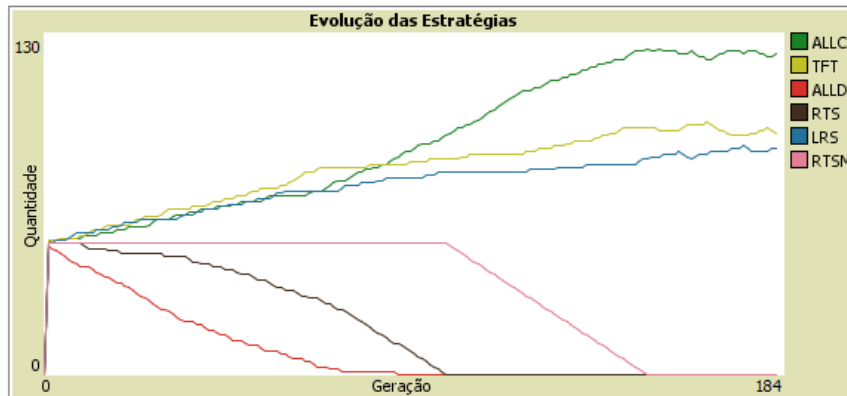
Logo, é possível que a desvantagem gerada pelo baixo valor de w tenha sido compensada pela vantagem informacional média obtida por cada estratégia sobre os seus oponentes.

b) 2ª fase: $w = 0,4$

Ao alteramos w para 0,4, figura 25, observa-se que a estratégia que predominará em frequência deixa de ser o TFT dando lugar para a estratégia ALLC e LRS.

Estas últimas duas estratégias passam a ter um crescimento acelerado praticamente imediatamente após a extinção das estratégias ALLD e RTS e o início do declínio da estratégia RTSM.

Novamente as estratégias não cooperativas e as estratégias prudentes não tiveram quaisquer tipos de chances de aumentar em frequência nesta condição de jogo alternado.



Monitora o fitness médio das estratégias

ALLD	ALLC	TFT	RTS	LRS	RTSM
N/A	1036	1036	N/A	1036	N/A

Monitora a quantidade de cada estratégia

ALLD	ALLC	TFT	RTS	LRS	RTSM
0	122	92	0	86	0

Figura 25 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas com Jogadas Alternadas e sem a presença de ruído com $w = 0,40$ (elaborado pelo próprio autor)

Apesar das estratégias ALLC, LRS e TFT serem bem parecidas, é a maneira como cada uma irá responder a não cooperação que irá as diferenciar uma da outra.

É interessante notar que para as estratégias consideradas na nossa simulação uma combinação de jogo alternado com um alto valor de w , faz com que a melhor resposta para a não cooperação seja a de cooperação incondicional que é justamente aquilo que faz a estratégia ALLC.

Não queremos dizer que num jogo alternado e sem ruído a melhor estratégia seja a cooperação incondicional e total do tipo ALLC. Já que nas nossas simulações, foi a presença e a combinação das outras estratégias mais reativas e prudentes que possibilitou que a estratégia ALLC pudesse prosperar para altos valores de w .

Talvez o ponto que chame a atenção aqui é justamente como a estratégia mais ingênua de todas pudesse se destacar frente a outras bem mais reativas.

Voltaremos a analisar este fato no capítulo reservado para a Discussão.

c) 3ª fase: $w = 0,95$

Para este valor de w não se observou diferenças significativas na evolução das estratégias seja no jogo simultâneo ou alternado.

Observando o gráfico da figura 26 (direita) notamos que semelhante ao jogo simultâneo, existe um decréscimo rápido da estratégia ALLC acompanhada pelo aumento da estratégia ALLD.

A estratégia ALLD se estabiliza numa certa frequência e enquanto isso, a extinção da estratégia ALLC começa a impactar também na diminuição da estratégia LRS que é acompanhada pelo aumento da estratégia TFT.

A extinção da estratégia LRS conduz à extinção em sequência das estratégias RTS e RTSM. Em paralelo a isso, pode-se observar um aumento persistente da frequência da estratégia TFT e uma diminuição gradual da estratégia ALLD.

O torneio terminou com a extinção da estratégia RTSM e com a estratégia TFT como a única vencedora.

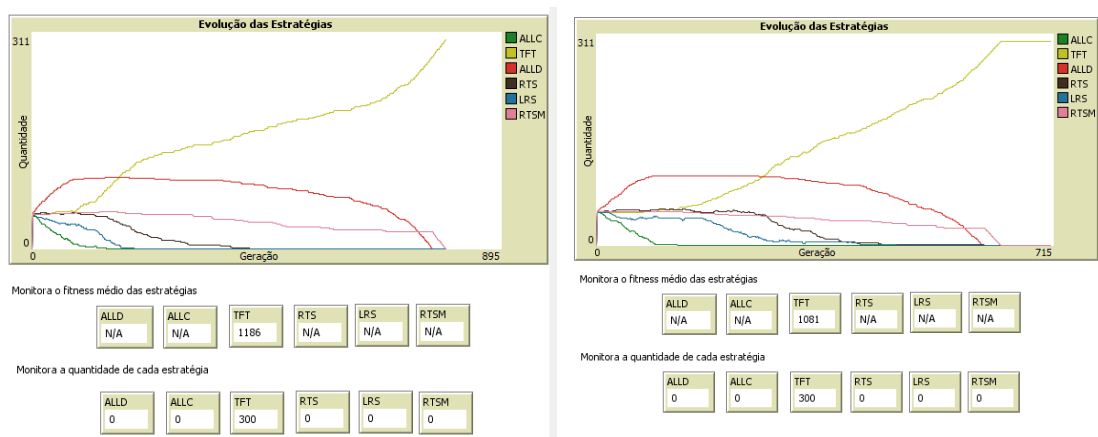


Figura 26 – Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas (esquerda) e com Jogadas Alternadas (direita) e sem a presença de ruído com $w = 0,95$ (elaborado pelo próprio autor)

16. RECONCILIANDO OS MODELOS NÃO ESPACIAIS COM INVESTIMENTO VARIÁVEL POR MEIO DA SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTE E COM A PRESENÇA DE RUÍDO

Inicialmente, analisaremos o caso do jogo simultâneo, e em seguida, o do jogo alternado.

Procuraremos manter os capítulos seguintes com os mesmos parâmetros utilizados nas simulações dos capítulos correspondentes, mas sem a presença de ruído. Talvez isso, possa ajudar a traçar as semelhanças e diferenças entre estes dois casos.

16.1 Simulando torneios (todos contra todos) com jogadas simultâneas e com a presença de ruído

Novamente apresentamos na tabela 16, as aptidões médias do jogador focal linha ao jogar o dilema do prisioneiro contínuo e iterado com ruído e com jogadas simultâneas com o jogador coluna. Para as simulações utilizamos uma população composta de uma única díade.

Os mesmos valores para os parâmetros b , c , $fitness$ basal e w foram utilizadas aqui, i.e., $b=4$, $c=1$, $fitness$ basal = 1000 e $w = 0,5$. Simulamos 1000 gerações tendo em cada geração 100 rodadas. Adicionamos um certo ruído no jogo ao atribuímos um valor de 5% para o parâmetro p .

		Jogador Coluna					
		ALLC	LRS	TFT	RTSM	RTS	ALLD
Jogador Linha	ALLC	1300,00 ±0	1297,50 ±1,86	1295,08 ±3,66	1194,36 ±10,18	1015,60 ±14,32	900,00 ±0
	LRS	1300,59 ±0,58	1297,61 ±1,27	1294,18 ±4,11	1187,61 ±8,52	1031,79 ±14,64	924,02 ±2,49
	TFT	1301,08 ±0,96	1297,71 ±2,05	1293,12 ±4,45	1178,65 ±7,63	1011,85 ±7,53	948,37 ±4,99
	RTSM	1326,44 ±2,55	1299,36 ±4,09	1264,21 ±8,08	1149,99 ±2,27	1035,41 ±4,74	973,63 ±2,48
	RTS	1371,09 ±3,58	1301,69 ±8,14	1221,60 ±16,23	1121,27 ±6,83	1056,49 ±5,67	992,80 ±0,52
	ALLD	1400,00 ±0	1303,98 ±9,97	1206,53 ±19,88	1105,57 ±9,85	1028,61 ±1,82	1000,00 ±0

Tabela 16 - Aptidão média e desvio-padrão do jogador focal linha interagindo com o jogador coluna para valores de $b = 4$, $c = 1$, $w = 0,5$, $p = 0,05$ e $fitness$ basal = 1000 em 1000 gerações com 100 rodadas por geração num jogo simultâneo e com ruído.

Para possibilitar uma avaliação melhor dos valores da tabela 16, vamos compará-los com àqueles da tabela 11, referente ao jogo simultâneo e sem ruído.

A tabela 17 apresenta a variação percentual da aptidão média de um jogo em relação a outro para cada estratégia do jogador linha.

	ALLC	LRS	TFT	RTSM	RTS	ALLD
ALLC	0,00%	-0,19%	-0,38%	-0,40%	-0,02%	0,00%
LRS	0,05%	-0,18%	-0,45%	-0,39%	-0,05%	-0,11%
TFT	0,10%	-0,17%	-0,53%	-0,36%	0,36%	-0,18%
RTSM	0,07%	-0,07%	-0,25%	0,00%	0,24%	-0,14%
RTS	-0,01%	0,10%	0,34%	0,35%	-0,23%	-0,04%
ALLD	0,00%	0,23%	0,58%	0,41%	0,18%	0,00%

Tabela 17 - Variação percentual da aptidão média do jogador focal linha de um jogo simultâneo e sem ruído para um jogo simultâneo e com ruído

Novamente hachuramos de verde as caselas que indicam um aumento, enquanto que o vermelho, uma diminuição da aptidão média em decorrência da alteração do jogo.

Algumas observações importantes podem ser feitas da tabela 17:

- A estratégia que mais se beneficiou com a introdução do ruído foi a ALLD. Em contrapartida, a maior diminuição percentual da aptidão média ocorreu com a estratégia TFT;
- Na média, as reduções percentuais de aptidão média foram observadas em boa parte das estratégias consideradas generosas, como a estratégia LRS e TFT. Enquanto isso, a estratégia ALLD e a RTS tiveram os maiores aumentos percentuais.
- Boa parte das estratégias tiveram um ligeiro aumento percentual da aptidão média quando confrontadas com a estratégia ALLC na presença de ruído. Isso decorre do fato da estratégia ALLC ser um cooperador incondicional, e da presença de ruído possibilitar que estas estratégias incorram num custo menor para poder obter da estratégia ALLC o mesmo benefício.

Podemos esperar que a presença de ruído favoreça as estratégias como o ALLD e o RTS e penalize as estratégias LRS e TFT, conseqüentemente, tenda a favorecer a não cooperação em comparação com o jogo simultâneo sem ruído para os mesmos cenários simulados.

Para avaliar o impacto do ruído nos torneios, fixamos um total de 300 agentes, sendo 50 referentes a cada uma das seis estratégias representativas (ALLC, ALLD, TFT, LRS, RTS e RTSM).

Todos os agentes foram dotados de um fitness basal de 1000.

Os valores de b e c , benefício e custo, foram mantidos em 4 e 1, respectivamente.

Ao longo da simulação variamos o parâmetro w entre 0 e 0,95, com incrementos de 0,05, e o parâmetro p entre 0 e 0,10, com incrementos de 0,01. Consideramos que valores maiores do que 0,10 para o parâmetro p já seriam exagerados.

Por conta da grande quantidade de cenários a serem simulados e do tempo de simulação para cada um, nos restringimos a realizar apenas 5 experimentos ou torneios para cada cenário.

O critério de parada do torneio continuava sendo após 2.500 gerações ou se num dado instante restasse uma única estratégia.

As simulações geraram uma grande quantidade de dados. Quando os analisamos, percebemos que poderíamos agrupá-los considerando as estratégias sobreviventes ao final dos torneios para cada valor do parâmetro w e p .

A figura 27 apresenta a evolução da frequência de cada estratégia em função do agrupamento feito para os valores de w e p .

Os valores de w e p estão indicados no eixo das abcissas de acordo com a seguinte notação: valores de w (valores de p), e.g., 0 a 0,25 (0 a 10%) significa para valores de w entre 0 a 0,25 e de p entre 0 a 10%. Propositadamente, escolhemos expressar os valores de w como números decimais, enquanto valores de p , como valores percentuais.

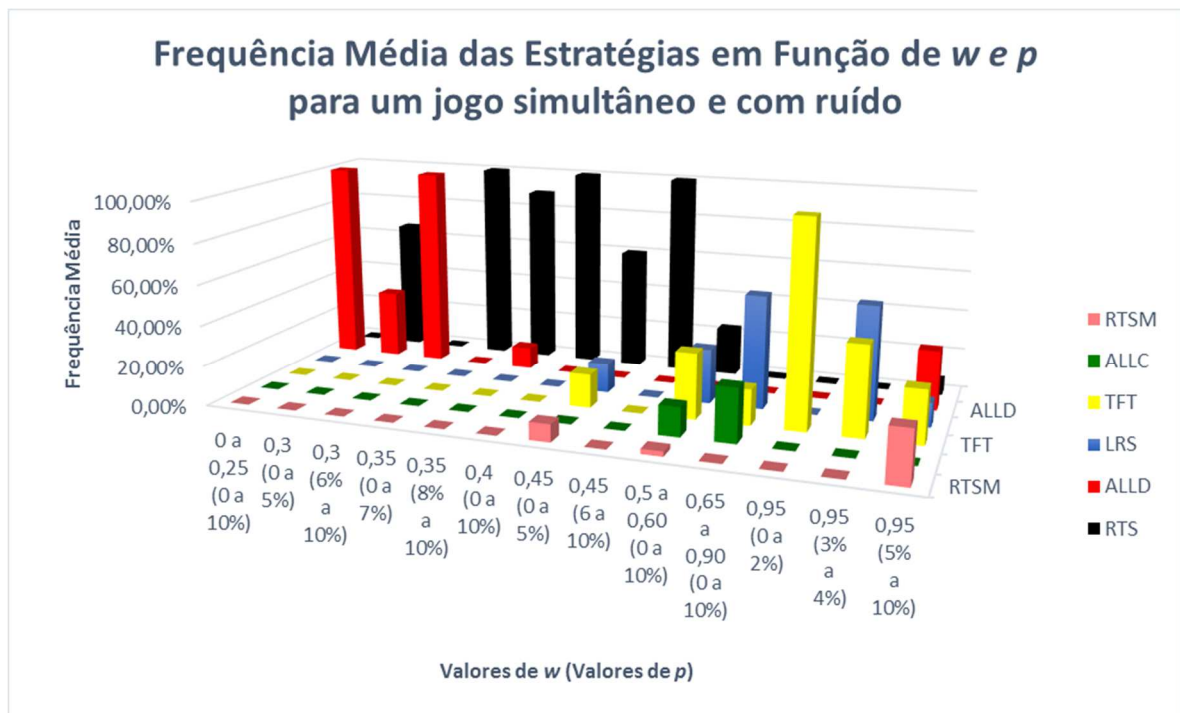


Figura 27 - Evolução das frequências médias de cada estratégia em função de w e p para um jogo simultâneo e com ruído

Os principais efeitos da introdução de ruído podem ser observados na figura 27.

Faremos a análise do torneio para este caso pela separação de valores específicos e faixas de valores para os parâmetros w e p .

Para valores de w entre 0 e 0,25 e p entre 0 e 10% tem-se que a estratégia ALLD é a vencedora do torneio e as outras cinco estratégias são extintas. Isso ocorre independentemente do nível de ruído inserido no torneio.

Valores de $w = 0,3$ e com uma probabilidade de se cometer um erro de percepção entre 0 a 5%, pode-se ver que o resultado do torneio se destaca entre as estratégias ALLD e RTS. Ainda para este valor de w , com o aumento do nível de ruído, observa-se que a estratégia ALLD passa a ser a única vencedora do torneio.

A alteração do valor de w para 0,35 ou 0,4, parece que enfraquece a estratégia ALLD independente da presença de erros. É possível notar que para estes casos existe uma predominância da estratégia RTS ao final dos torneios.

Estratégias mais generosas, como o TFT e o LRS, começam a surgir, mesmo com uma frequência inferior ao da estratégia RTS ao final dos torneios quando utilizamos um $w=0,45$ e p entre 0 e 5%. Ao aumentarmos o nível de ruído para um valor igual a 6% ou superior, observa-se que a estratégia RTS passa a ser a única vencedora do torneio.

Valores de w entre 0,50 e 0,60 e o parâmetro p variando entre 0 e 10% possibilitam que uma pequena frequência da estratégia ALLC possa aparecer ao final dos torneios. Estratégias como o TFT e LRS começam também a aparecer com frequências médias superiores ao da estratégia RTS.

Valores de w entre 0,65 e 0,90 e do parâmetro p entre 0 e 10% tende agora a favorecer estratégias mais generosas e menos prudentes. É possível observar ao final dos torneios apenas as presenças das estratégias LRS, TFT e ALLC. Apresentando a estratégia LRS a maior frequência média, além disso, não se nota há mais nenhum traço da estratégia RTS.

Novamente destacamos o valor de $w = 0,95$. Pode-se observar que conjuntos diferentes de estratégias surgem aos finais dos torneios à medida que alteramos o nível de ruído. Valores do parâmetro p entre 0 e 2%, tornam a estratégia TFT a única vencedora do torneio, enquanto que níveis de ruído entre 3% e 4% possibilitam que juntamente com a estratégia TFT apareça, até com uma frequência superior que a da estratégia TFT, a estratégia LRS. Com valores de p

iguais e superiores a 5%, é possível observar a presença de todas as estratégias, excetuando a estratégia ALLC, ao final dos torneios.

Na tabela 18 apresentamos as frequências médias e os seus respectivos desvios-padrão para os valores de w e de p utilizadas para construir o gráfico da figura 27.

w	p	TFT	ALLC	ALLD	RTS	LRS	RTSM
0 a 0,25	0 a 10%	0% \pm 0	0% \pm 0	100% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0
0,30	0 a 5%	0% \pm 0	0% \pm 0	33,93% \pm 32,13%	66,07% \pm 32,13%	0% \pm 0	0% \pm 0
0,30	6% a 10%	0% \pm 0	0% \pm 0	100% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0
0,35	0% a 7%	0% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0	100% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0
0,35	8% a 10%	0% \pm 0	0% \pm 0	10,84% \pm 22,70%	89,16% \pm 22,70%	0% \pm 0	0% \pm 0
0,40	0 a 10%	0% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0	100% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0
0,45	0 a 5%	16,65% \pm 30,80%	0,18% \pm 1,10%	0% \pm 0	60,00% \pm 49,49%	14,57% \pm 27,38%	8,59% \pm 27,39%
0,45	6% a 10%	0% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0	100% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0
0,50 a 0,60	0 a 10%	32,41% \pm 29,89%	14,33% \pm 15,07%	0% \pm 0	23,77% \pm 42,66%	27,07% \pm 23,01%	2,42% \pm 6,54%
0,65 a 0,90	0 a 10%	17,64% \pm 16,50%	26,30% \pm 12,19%	0% \pm 0	0% \pm 0	55,85% \pm 24,84%	0,21% \pm 1,79%
0,95	0 a 2%	100% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0
0,95	3% a 4%	44,00% \pm 49,60%	0% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0	56,00% \pm 49,60%	0% \pm 0
0,95	5% a 10%	26,24% \pm 19,92%	0% \pm 0	29,59% \pm 12,04%	6,79% \pm 14,31%	11,78% \pm 18,80%	25,60% \pm 15,13%

Tabela 18 – Frequência média de cada estratégia acompanhada do seu respectivo desvio-padrão para valores escolhidos de w e p

Quando analisamos a tabela 18 é interessante prestarmos atenção na informação subjacente aos desvios-padrão, e.g., para $w = 0,95$ e p entre 3% a 4%, tem-se que as duas estratégias que se destacaram no torneio foram as estratégias TFT e LRS, respectivamente, com frequências médias iguais a 44,00% \pm 49,46% e 56,00% \pm 49,46%. O que chama a atenção aqui é o alto valor dos desvios-padrão. A magnitude destes desvios frente às suas médias sinaliza que o resultado do torneio pendeu para populações homogêneas ou da estratégia TFT ou da estratégia LRS. Neste caso, a quantidade de torneios ganhos pela estratégia LRS deve ter sido ligeiramente superior já que a sua frequência média é um pouco maior que a da estratégia TFT.

Contrapondo o exemplo anterior, observe quando $w = 0,95$ e p se encontra entre 5% e 10%. As médias e desvios-padrão apresentados remetem a populações heterogêneas ao final dos torneios.

Talvez esta população heterogênea possa convergir para uma única estratégia vencedora caso tivéssemos permitido um tempo de simulação superior a 2500 gerações.

Para ilustrar este fato vamos analisar duas simulações.

A primeira é quando w for igual a 0,35 e p varia entre 0 e 10%. Já vimos na figura 27 que para estas condições, a estratégia RTS é aquela que se sai melhor em comparação com todas as outras estratégias, sagrando-se vencedora na maioria dos torneios.

Na figura 28 apresentamos uma simulação nas condições: sem ruído e com ruído para jogadas simultâneas. Fixamos o valor de w em 0,35, e no caso de ruído, utilizamos um p igual a 0,07.

Perceba que ao colocar ruído no jogo, começamos a observar uma dificuldade cada vez maior para a extinção da estratégia ALLD pela estratégia RTS.

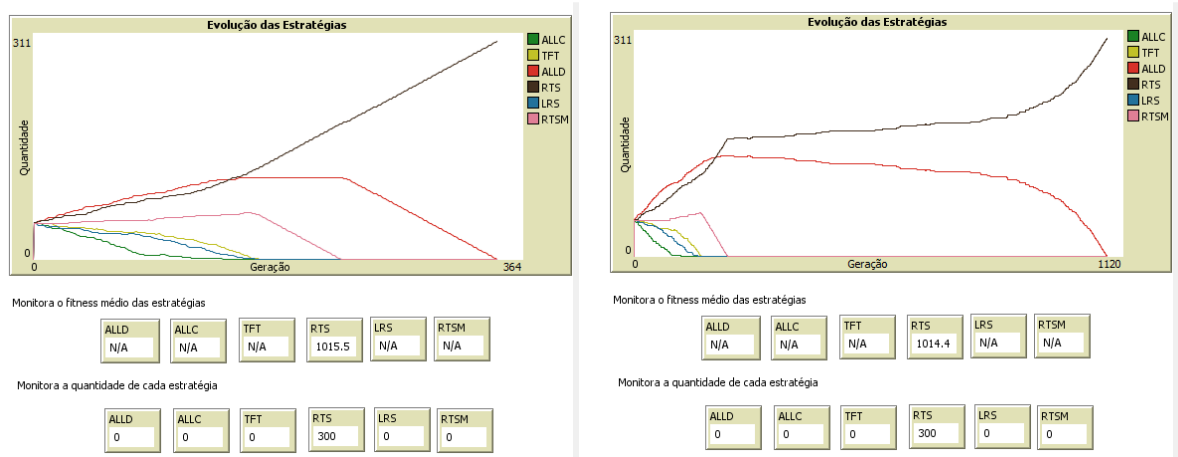


Figura 28 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas sem (direita) e com a presença de ruído (esquerda) com $w = 0,35$ e $p = 0,07$ (elaborado pelo próprio autor)

Observe que o número necessário de gerações para a extinção de todas as estratégias com exceção do RTS passou de 346 para 1085 gerações.

Para dar uma ideia mais exata da magnitude do número de gerações médias necessárias para a extinção de todas as estratégias com exceção da estratégia RTS. Simularmos 50 vezes cada um dos torneios apresentados na figura 28.

Obtemos que o número médio necessário de gerações juntamente com o seu respectivo desvio-padrão passou de $416 \pm 75,48$ gerações, no caso sem ruído, para $910,50 \pm 858,84$ gerações, quando o ruído era introduzido no torneio por meio de um valor de p igual a 0,7.

A nossa segunda simulação serve para enfatizar a dificuldade de convergência para uma população homogênea quando restringimos o nosso torneio ao máximo de 2500 geração.

Novamente vamos utilizar de um resultado conhecido da figura 27. Para esta simulação fixamos o valor de w em 0,95 e p em 7%.

Observe na figura 29 que as maiores frequências são das estratégias RTSM e ALLD. A estratégia LRS participa com menos de 5% da população. Mesmo após 5360 gerações, não há qualquer sinal de que o resultado do torneio penda para uma ou outra estratégia.

Por conta de fatos como esse e por uma limitação de tempo, adotamos arbitrariamente um tempo de parada em 2500 gerações.

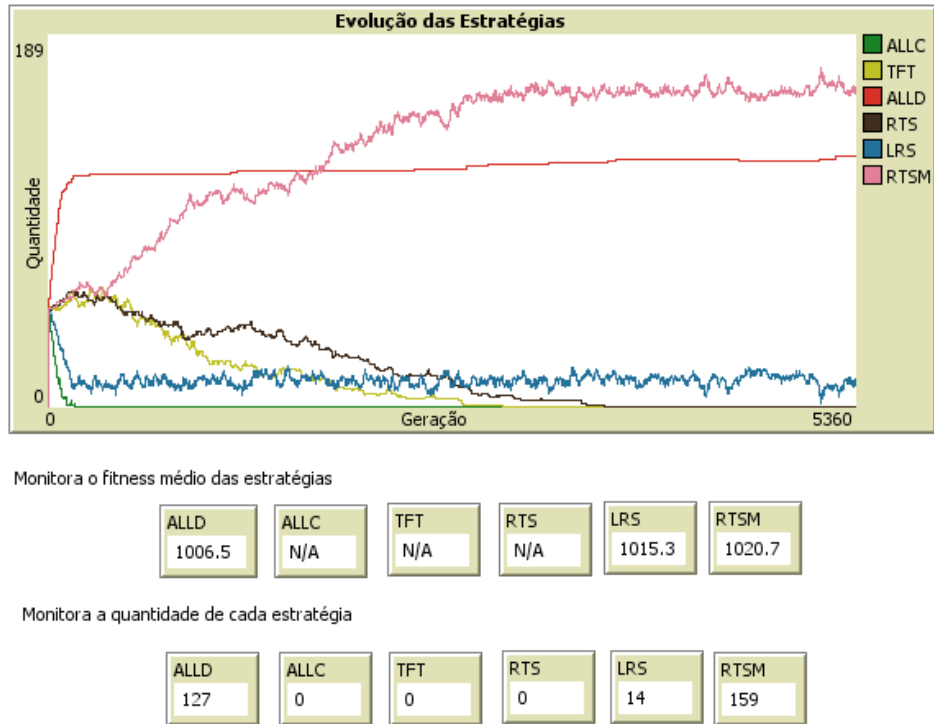


Figura 29 - Evolução das Estratégias num Torneio com Jogadas Simultâneas e com a presença de ruído com $w = 0,95$ e $p = 7\%$ (elaborado pelo próprio autor)

16.2 Simulando torneios (todos contra todos) com jogadas alternadas e com a presença de ruído

Começamos apresentando a tabela padrão de aptidões médias do jogador linha ao jogar o dilema do prisioneiro contínuo e iterado com ruído e com jogadas alternadas com o jogador coluna. A nossa população foi composta de uma única díade.

Utilizadas $b = 4$, $c = 1$, fitness basal = 1000, $w = 0,5$ e $p = 5\%$. Simulamos 1000 gerações tendo em cada geração 100 rodadas.

		Jogador Coluna					
		ALLC	LRS	TFT	RTSM	RTS	ALLD
Jogador Linha	ALLC	1300,00 ±0	1296,32 ±2,30	1292,60 ±4,51	1242,14 ±9,10	1051,07 ±16,22	900,00 ±0
	LRS	1300,89 ±0,67	1296,32 ±1,57	1291,16 ±4,78	1231,71 ±7,53	1075,32 ±13,39	936,54 ±2,12
	TFT	1301,85 ±1,16	1296,5 ±2,43	1289,40 ±5,28	1218,02 ±6,27	1044,01 ±3,56	973,02 ±4,32
	RTSM	1314,48 ±2,27	1273,50 ±2,51	1220,27 ±6,33	1150,07 ±2,76	1056,72 ±3,07	985,46 ±2,29
	RTS	1362,24 ±4,06	1256,76 ±5,26	1136,52 ±13,22	1086,03 ±5,87	1072,10 ±5,96	994,22 ±0,58
	ALLD	1400,00 ±0	1253,82 ±8,40	1107,92 ±17,24	1058,22 ±9,09	1022,96 ±1,99	1000,00 ±0

Tabela 19 - Aptidão média e desvio-padrão do jogador focal linha interagindo com o jogador coluna para valores de $b = 4$, $c = 1$, $w = 0,5$, $p = 0,05$ e fitness basal = 1000 em 1000 gerações com 100 rodadas por geração num jogo alternado e com ruído.

Já vimos que num jogo alternado, por conta do ganho informacional, a estratégia não cooperativa ALLD encontra dificuldades em explorar estratégias responsivas, como a estratégia TFT.

É bem provável que a inclusão de níveis de ruído altere significativamente este cenário. Semelhante ao caso simultâneo, espera-se que um nível significativo de ruído possa anular os ganhos informacionais advindos da dinâmica de um jogo alternado.

Podemos avaliar o impacto do ruído construindo uma tabela comparativa de variação percentual das aptidões médias para cada estratégia do jogador linha tomando como referência o jogo alternado e sem ruído, tabela 13.

A tabela 20 apresenta a variação percentual da aptidão média de um jogo em relação a outro para cada estratégia do jogador linha.

	ALLC	LRS	TFT	RTSM	RTS	ALLD
ALLC	0,00%	-0,28%	-0,57%	-0,57%	-0,35%	0,00%
LRS	0,07%	-0,28%	-0,68%	-0,57%	-0,29%	-0,12%
TFT	0,14%	-0,27%	-0,82%	-0,60%	0,17%	-0,18%
RTSM	0,12%	-0,11%	-0,41%	0,01%	0,17%	-0,21%
RTS	0,07%	0,13%	0,46%	0,53%	-0,20%	-0,08%
ALLD	0,00%	0,28%	0,65%	0,71%	0,29%	0,00%

Tabela 20 - Variação percentual da aptidão média do jogador focal linha de um jogo alternado e sem ruído para um jogo alternado e com ruído

Novamente hachuramos de verde as caselas que indicam um aumento, enquanto que o vermelho, uma diminuição da aptidão média em decorrência da alteração do jogo.

Algumas observações importantes podem ser feitas da tabela 20:

- A estratégia que mais se beneficiou com a introdução do ruído foi a ALLD. Observamos um aumento percentual de 0,71% sobre a aptidão média do jogador coluna quando ele utiliza a estratégia ALLD. Em contrapartida, a maior diminuição percentual da aptidão média ocorreu com a estratégia TFT com uma queda de 0,82%.
- Na média, as reduções percentuais de aptidão média foram observadas em boa parte das estratégias consideradas generosas, como a estratégia LRS e TFT. Enquanto isso, a estratégia ALLD e a RTS tiveram os maiores aumentos percentuais. A introdução do ruído diminui a vantagem informacional do segundo jogador sobre o seu oponente na primeira rodada e abre a oportunidade para que estratégias não cooperadoras, como o ALLD, e prudentes, como o RTS, possam explorar estratégias mais cooperativas como as estratégias ALLC, LRS e TFT.
- Boa parte das estratégias tiveram um ligeiro aumento percentual da aptidão média quando confrontadas com a estratégia ALLC na presença de ruído.

Para avaliar o impacto do ruído nos torneios, como em todas as outras análises, fixamos um total de 300 agentes, sendo 50 referentes a cada uma das seis estratégias representativas (ALLC, ALLD, TFT, LRS, RTS e RTSM).

Todos os agentes foram dotados de um fitness basal de 1000.

Os valores de b e c , benefício e custo, foram mantidos em 4 e 1, respectivamente.

Ao longo da simulação variamos o parâmetro w entre 0 e 0,95, com incrementos de 0,05, e o parâmetro p entre 0 e 0,10, com incrementos de 0,01.

Simulamos 5 experimentos ou torneios para cada cenário.

O critério de parada do torneio continuava sendo após 2.500 gerações ou se num dado instante restasse uma única estratégia.

Ao avaliar os dados das simulações optamos por excluir todos os casos sem ruído. Mesmo porque a análise desta condição para o jogo alternado já foi feita no capítulo 15.2.

Além disso, notamos que os resultados finais dos torneios variavam muito pouco frente aos níveis de ruído utilizados para um valor de w fixado, e.g., para um valor de $w=0,25$, pouca diferença se observou no resultado do torneio para quaisquer valores de p escolhidos entre 0 e 10%.

Desta forma, optamos por apresentar os resultados dos torneios simulados por cada valor do parâmetro w .

A figura 30 apresenta a evolução da frequência de cada estratégia em função do agrupamento feito para os valores de w .

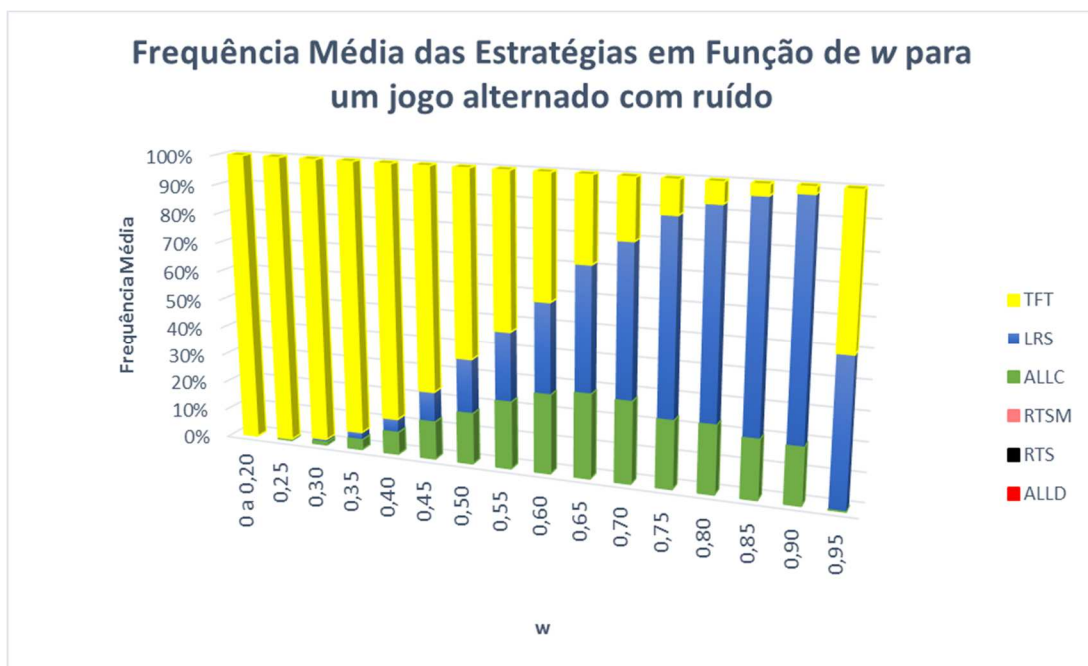


Figura 30 - Evolução das frequências médias de cada estratégia em função de w para um jogo alternado e com ruído

Na tabela 21 apresentamos as frequências médias e os seus respectivos desvios-padrão para os valores de w e de p utilizadas para construir o gráfico da figura 30.

w	p	TFT	ALLC	ALLD	RTS	LRS	RTSM
0 a 0,20	1% a 10%	99,99% \pm 0,06%	0% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0	0,01% \pm 0,06%	0% \pm 0
0,25	1% a 10%	99,47% \pm 0,59%	0,23% \pm 0,39%	0% \pm 0	0% \pm 0	0,30% \pm 0,37%	0% \pm 0
0,30	1% a 10%	97,97% \pm 0,85%	1,03% \pm 0,74%	0% \pm 0	0% \pm 0	1,00% \pm 0,93%	0% \pm 0
0,35	1% a 10%	93,83% \pm 3,06%	3,53% \pm 0,92%	0% \pm 0	0% \pm 0	2,63% \pm 3,15%	0% \pm 0
0,40	1% a 10%	87,53% \pm 5,48%	7,77% \pm 1,90%	0% \pm 0	0% \pm 0	4,70% \pm 4,10%	0% \pm 0
0,45	1% a 10%	76,47% \pm 9,81%	13,07% \pm 1,44%	0% \pm 0	0% \pm 0	10,47% \pm 8,71%	0% \pm 0
0,50	1% a 10%	63,70% \pm 13,61%	17,57% \pm 2,15%	0% \pm 0	0% \pm 0	18,73% \pm 13,70%	0% \pm 0
0,55	1% a 10%	52,87% \pm 14,43%	23,10% \pm 2,17%	0% \pm 0	0% \pm 0	24,03% \pm 15,66%	0% \pm 0
0,60	1% a 10%	41,73% \pm 17,01%	27,07% \pm 5,57%	0% \pm 0	0% \pm 0	31,20% \pm 21,13%	0% \pm 0
0,65	1% a 10%	28,43% \pm 17,55%	28,80% \pm 5,49%	0% \pm 0	0% \pm 0	42,77% \pm 22,73%	0% \pm 0
0,70	1% a 10%	20,00% \pm 17,11%	27,83% \pm 8,69%	0% \pm 0	0% \pm 0	52,17% \pm 24,92%	0% \pm 0
0,75	1% a 10%	10,97% \pm 13,48%	23,03% \pm 7,11%	0% \pm 0	0% \pm 0	66,00% \pm 20,19%	0% \pm 0
0,80	1% a 10%	6,73% \pm 10,98%	23,17% \pm 6,94%	0% \pm 0	0% \pm 0	70,10% \pm 17,56%	0% \pm 0
0,85	1% a 10%	3,43% \pm 7,58%	20,13% \pm 6,36%	0% \pm 0	0% \pm 0	76,43% \pm 13,78%	0% \pm 0
0,90	1% a 10%	2,13% \pm 4,88%	19,20% \pm 6,91%	0% \pm 0	0% \pm 0	78,67% \pm 11,45%	0% \pm 0
0,95	1% a 10%	50,00% \pm 50,85%	0% \pm 0	0% \pm 0	0% \pm 0	50,00% \pm 50,85%	0% \pm 0

Tabela 21 – Frequência média de cada estratégia acompanhada do seu respectivo desvio-padrão para valores escolhidos de w e p

Analisando os dados da tabela 21 e do gráfico da figura 30 observamos que mesmo adicionando o ruído no torneio, em nenhum momento, as estratégias ALLD, RTS, RTSM ou ALLC conseguiram ameaçar a hegemonia das estratégias TFT e LRS. Estas duas estratégias foram as grandes vencedoras para os diversos cenários simulados.

Observou-se que valores muito baixos de w combinados com quaisquer valores de p , entre 1% e 10%, tendiam a favorecer a estratégia TFT.

O aumento gradual do parâmetro w , para quaisquer valores de p entre 1% e 10%, fez na média com que a participação da estratégia TFT nos resultados dos torneios caísse, efeito contrário, observou-se para a estratégia LRS.

Outro ponto que constatamos é que a estratégia TFT se saia melhor para valores baixos de p , i.e., cenários com pouco ruído. Enquanto que a estratégia LRS a se sair melhor do que a estratégia TFT quando os valores do parâmetro p se aproximavam de 10%.

Para poder dar uma ideia melhor do impacto do nível de ruído sobre as estratégias TFT e LRS, tomemos como exemplo, as simulações fixando o valor de $w=0,95$ e valores de p entre 0 e 10%. Das simulações realizadas nestas condições, a estratégia TFT foi a vencedora em praticamente todas as simulações para valores de p entre 1% e 4%, por sua vez, a estratégia LRS venceu a maioria dos torneios para valores de p entre 5% e 10%.

Uma discussão mais detalhada será destinada ao capítulo 17.

17. DISCUSÃO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo principal conciliar duas estratégias com algumas características antagônicas no jogo do dilema do prisioneiro contínuo e iterado.

De um lado a estratégia RTS que denominamos de prudente, i.e., investe inicialmente pouco na relação e vai aumentando o investimento e, do outro, a estratégia LRS generosa, otimista e intransigente.

Para tentar conciliar estas duas estratégias tão diferentes, optamos por realizar torneios, semelhantemente aos diversos trabalhos relacionados a este assunto. Os torneios simulados avaliaram o desempenho destas duas estratégias vis à vis outras quatro. Estas estratégias foram escolhidas após a revisão da literatura e são consideradas como algumas das mais emblemáticas em problemas envolvendo cooperação e o dilema do prisioneiro.

Procuramos explorar principalmente as inter-relações existentes entre os parâmetros de configuração dos torneios e os resultados dos torneios, pois desta forma seria possível obter mais peças para o quebra-cabeça do dilema do prisioneiro contínuo e iterado e as estratégias RTS e LRS.

Exploramos o dilema com jogadas simultâneas e jogadas alternadas, alteramos o número esperado de encontros por díade através do parâmetro w e avaliamos o comportamento do torneio frente a introdução de uma chance de cada agente poder cometer erros de percepção frente a jogada do oponente.

Vamos passar a discutir detalhadamente cada uma das alterações mencionadas:

a) Jogo Simultâneo versus Jogo Alternado

A alteração da ordem das jogadas impactou profundamente os resultados do nosso torneio.

Atribuímos este fato a ideia de um ganho informacional que o 2º jogador teria sobre o 1º jogador no dilema.

A maior perda de aptidão média ocorreu com a estratégia ALLD quando ela interage com a estratégia TFT.

A possibilidade de ser o segundo a jogar possibilita que estratégias, como o TFT, identifique sem incorrer em custos, estratégias não cooperativas, como o ALLD. Outras estratégias como o LRS, RTS e RTSM incorreriam em custos médios menores perante a estratégia ALLD, pois sendo o segundo a jogar, já poderiam responder a não cooperação com uma diminuição drástica do investimento para a próxima rodada.

As estratégias que obtiveram os maiores ganhos médios em relação a estratégia ALLD são também aquelas que possuem os maiores investimentos iniciais, em ordem decrescente, a estratégia TFT e LRS, RTSM e RTS.

Estratégias generosas, como o ALLC, LRS e TFT também aumentaram a sua aptidão média frente a estratégias prudentes como o RTS e RTSM, pois sendo as primeiras a jogarem, tendem a ganhar “confiança” das estratégias prudentes, levando o jogo para um nível maior de cooperação em comparação com o jogo simultâneo.

Os ganhos dessas estratégias generosas contrastam com as perdas das estratégias prudentes.

Essas estratégias prudentes perdem no jogo alternado em comparação com o jogo simultâneo, pois investem na média mais para obter o mesmo benefício. Isso ocorre, e.g., quando elas interagem com a estratégia ALLC.

Além disso, sendo o primeiro jogador de uma díade formada ou pela estratégia TFT e LRS também gera uma diminuição da aptidão média das estratégias prudentes. Pois obrigariam àquelas estratégias a investir mais em comparação ao jogo simultâneo.

Por conta de todos estes pontos, os maiores ganhadores com o jogo alternado são justamente as estratégias generosas como o ALLC, LRS e TFT, enquanto os maiores perdedores foram as estratégias RTS, RTSM e ALLD.

Como consequência disto, enquanto que no jogo simultâneo era possível ter situações em que a melhor estratégia a ser utilizada podia ser a de não cooperação (ALLD), uma estratégia prudente (RTS) ou uma mais generosa (TFT e LRS), no jogo alternado as únicas estratégias que poderiam gerar os maiores ganhos líquidos nos torneios foram as estratégias cooperativas ALLC, TFT e LRS.

Os resultados dos torneios com jogadas alternadas e sem ruído contrastam com a vitória obtida pela estratégia RTS em torneios semelhantes simulados por Roberts e Sherratt (1998).

Isso nos fez questionar quais foram os motivos que fizeram os resultados das nossas simulações diferirem substancialmente das de Roberts e Sherratt (1998).

A partir uma nova leitura de Roberts & Sherratt (1998), agora, com os resultados dos nossos torneios em mente, notamos que nos torneios simulados por eles, a estratégia RTS já parte de um valor de investimento inicial igual a de todas as outras estratégias do torneio, inclusive das estratégias consideradas as mais cooperativas.

Nos nossos torneios, a estratégia RTS parte de um valor de investimento inicial que corresponde a apenas 10% do investimento inicial de estratégias mais cooperativas como a ALLC, TFT e LRS. Desta forma, a nossa estratégia RTS acaba demorando mais para chegar no mesmo nível de cooperação obtido pelas estratégias ALLC, TFT e LRS quando interagem entre si.

É esta parametrização que fez a estratégia RTS perder para estas estratégias mais cooperativas nos nossos torneios e a tornou vencedora frente as estratégias mais cooperativas nos torneios de Roberts e Sherratt (1998).

Do nosso ponto de vista, a maneira como foi simulada a estratégia RTS por Roberts e Sherratt (1998) contrapõe-se com a sua essência que, de acordo com as próprias palavras de seus criadores, é de “*testing the water*” ao invés de dar “*leaps of faith*”.

Nas nossas simulações procuramos ser extremamente fiéis à ideia de “*testing the water*” ou de conferir a estratégia RTS esta característica de prudência.

b) Impacto da alteração do parâmetro w no resultado dos torneios

Também analisamos o impacto do parâmetro w para os jogos do tipo simultâneo e alternado.

Podemos interpretar o parâmetro w como um fator de incerteza associado ao futuro. Quando menor for este valor, mais incerto será o futuro e, conseqüentemente, menor será o número médios de encontros de uma díade.

Portanto, é de se esperar que quanto maior for este parâmetro, maiores poderão ser os benefícios auferidos por díades de cooperadores em comparação com díades de cooperadores e não cooperadores.

Ao variarmos o parâmetro w pudemos identificar claramente três fases para os torneios com jogadas simultâneas.

A primeira fase, para valores baixos de w , i.e., w entre 0 e 0,25, a única estratégia vencedora de todos os torneios simulados foi a estratégia não cooperativa ALLD. É provável que esta faixa de valores de w ainda não seja suficiente para fomentar a cooperação.

Ao aumentarmos o valor de w , começamos a perceber uma transição da não cooperação para a cooperação. A estratégia que promove esta transição é a RTS.

E como esta estratégia faz isso? Parece que existe uma compensação do baixo valor do parâmetro w com o comportamento de prudência que possui esta estratégia para estes cenários.

A prudência desta estratégia, traduzida pelo baixo investimento na rodada inicial, permite contornar o número médio baixo de encontros dado por um w na faixa de 0,30 a 0,40.

Ao longo das gerações, à medida que a estratégia RTS for sendo retribuída pela sua cooperação, maior será o seu investimento na próxima rodada. Tudo isso deve resultar em plena cooperação ao passo de algumas rodadas. Neste momento, não haverá nenhuma diferenciação, e.g., entre esta estratégia RTS e uma estratégia ALLC.

Observamos que com o aumento do valor do parâmetro w mais as estratégias generosas (x_0 grande) tendiam a serem favorecidas. Para valores de w maiores do que 0,50, estratégias, e.g., como LRS ou TFT, começaram a se mostrar bastante eficientes no nosso torneio.

Os resultados dos nossos torneios para jogadas simultâneas mostram que, via de regra, para valores muito baixos de w valeria a pena não cooperar. O aumento do valor de w que equivale a menor incerteza no futuro, nos conduz para estratégias prudentes, enquanto valores altos de w , permitem a utilização de estratégias mais generosas como a LRS.

Sobre o torneio com jogadas simultâneas ainda é preciso ressaltar o caso quando $w = 0,95$, era de se esperar que a cooperação pudesse ser plenamente favorecida com um valor tão alto de w fazendo com que estratégias não cooperativas não tenham nenhuma chance. O fato é que essa ideia não está totalmente correta.

Observamos que um alto valor de w permite que as díades tenham um número médio de encontros maiores. Isso será ótimo para uma díade formada por cooperadores, pois os benefícios da cooperação serão colhidos ao longo de número médio maior de encontros. Em

contrapartida, a estratégia ALLD será favorecida nas díades formadas com estratégias que cooperam incondicionalmente, como a estratégia ALLC, ou com uma estratégia otimista LRS.

Um alto valor de w como 0,95 possibilita que a estratégia ALLD possa explorar a ingenuidade da estratégia ALLC e o otimismo da estratégia LRS. Estas são as primeiras estratégias a serem extintas nas nossas simulações. Foi possível observar que a diminuição destas estratégias ocorria paralelamente ao aumento das frequências da estratégia ALLD.

O alto número de não cooperadores aliado a um alto valor de w também não favoreceu estratégias prudentes como o RTS e RTSM.

Apenas a estratégia TFT conseguiu obter uma aptidão média superior ao da estratégia ALLD. Diferente da estratégia LRS, a TFT não é otimista e foi essa característica que a permitiu colher os frutos de um cenário com um alto valor de w , mas sem correr o risco de ser explorada pela estratégia ALLD.

Para o jogo alternado, as mudanças do parâmetro w apenas alterou a composição das estratégias ALLC, TFT e LRS nos resultados dos torneios. Para valores baixos de w , pudemos observar uma maior participação da estratégia TFT. Isso deve decorrer do fato desta estratégia conseguir conciliar bons ganhos por conta da iteração com as estratégias generosas como ALLC e LRS, mas ser também dentre as três a que menos é explorada por estratégias prudentes e estratégias não cooperativas.

À medida que aumentávamos o valor de w , maior passava a ser a participação da estratégia ALLC frente às estratégias TFT e LRS nos resultados dos torneios. Como explicar isso?

Já vimos que as estratégias ALLC, TFT e LRS serão as mais beneficiadas com o jogo de jogadas alternadas e que as aptidões médias de cada uma dessas três estratégias serão iguais quanto elas interagem entre si num jogo alternado e sem ruído. Com a eliminação da estratégia ALLD e para valores cada vez maiores de w , é a estratégia ALLC a que consegue obter os maiores ganhos das iterações com as estratégias prudentes RTS e RTSM.

Por ser uma estratégia cooperadora incondicional, a estratégia ALLC é a única dentre as três que consegue obter mais rapidamente a “confiança” das estratégias prudentes, e sem a presença da estratégia ALLD, ela tem possibilidade de aumentar em frequência frente as outras duas.

O mesmo comportamento para $w=0,95$ também foi observado para as jogadas alternadas. Análise semelhante feita para o caso simultâneo cabe aqui também.

c) Impacto da introdução do ruído no resultado dos torneios

Como já era esperado, a introdução de ruído nos nossos torneios gerou uma dificuldade maior para que estratégias generosas e prudentes pudessem prosperar em comparação com o mesmo cenário sem a presença do ruído ao serem confrontadas com a estratégia não cooperativas ALLD. Isso ocorreu tanto para jogadas simultâneas quanto alternadas.

Por exemplo, quando introduzimos um nível de ruído maior do que 6% num jogo do tipo simultâneo para $w=0,30$, foi possível observar que o vencedor do nosso torneio passava da estratégia RTS para a estratégia ALLD.

No caso das jogadas alternadas foi possível observar que a presença de ruído favorecia a estratégia TFT para baixos valores de w . À medida que aumentávamos o valor de w , na presença de ruído, a resiliência da estratégia ALLD passava a impedir o aumento da frequência da estratégia ALLC. Em contrapartida, a estratégia que passou a ser favorecida foi a LRS, já que depois da estratégia ALLC é ela que consegue obter mais rapidamente a plena cooperação das estratégias prudentes.

A estratégia LRS em comparação a estratégia TFT conseguiu lidar melhor com erros nos torneios com jogadas alternadas. Em boa parte das simulações foi possível observar, para um valor de w fixado, que a estratégia TFT era a vencedora para valores de p próximos a 1%, enquanto que a estratégia LRS, para valores de p próximos a 10%. A que atribuímos isso?

A maneira como as estratégias LRS e TFT lidam com erros.

Diferentemente da estratégia LRS, a estratégia TFT não é uma estratégia otimista, i.e, ela pode reduzir consideravelmente o investimento na próxima rodada mediante um erro. Já o otimismo da estratégia LRS a impede de reduzir demais esse investimento. Isso implica que independente da magnitude do erro, a estratégia LRS sempre irá partir de um nível de cooperação superior ao da estratégia TFT. É essa a principal razão que a torna mais robusta a erros do que a estratégia TFT.

Um outro impacto decorrente da introdução do ruído, seja no caso alternado ou simultâneo, foi a limitação do número de gerações utilizadas nos torneios que nos impediu de conhecer o grande vencedor do torneio para alguns cenários. Mesmo assim, pudemos ter uma

ideia de quais seriam as estratégias privilegiadas para os valores de w e p utilizados em cada caso.

18. CONCLUSÃO

Esta pesquisa procurou contrapor duas estratégias bem distintas dentro do contexto do dilema do prisioneiro contínuo e iterado. A estratégia RTS que, segundo a nossa interpretação, é de natureza prudente, e a estratégia LRS, de natureza generosa, otimista e intransigente.

Como seria possível que estratégias tão distintas pudessem ser tão eficientes ao jogar o dilema?

Neste ponto é importante frisar que os métodos experimentais utilizados por Wahl e Nowak (1999 a e b) são distintos das de Roberts e Sherratt (1998). Enquanto a estratégia LRS é resultado de simulações baseadas numa dinâmica evolucionária, a estratégia RTS emerge como grande vencedora de simulações no formato de torneios.

Queríamos poder confrontar estas duas estratégias diante de um mesmo método, e assim, possibilitar uma conciliação.

Inicialmente, cogitamos o uso de simulações baseadas numa dinâmica evolucionária, i.e, avaliar a estabilidade de uma estratégia sujeita ao processo de seleção e que estivesse constantemente exposto a estratégias raras geradas por mutações.

Abandonamos essa ideia em virtude da enorme abrangência do estudo feito por Wahl e Nowak (1999a, 1999b) e optamos por entender estas diferenças por meio de torneios.

Acreditamos que a simulação por torneios concilia dois pontos extremamente pertinentes neste caso.

Primeiramente, é uma forma mais fácil e direta de avaliar e entender a dinâmica envolvendo estas duas estratégias, mais apropriada para um público sem muita familiaridade com este assunto ou com a matemática necessária para entendê-lo.

Em segundo lugar, poderíamos confrontar as duas estratégias num terreno comum, com as mesmas regras.

Diferente de outros trabalhos que empregam a simulação como metodologia, tivemos na nossa pesquisa, uma preocupação adicional. perguntamos-nos até que ponto a simulação poderia ser equiparada a um método científico.

Após uma extensa revisão bibliográfica, concluímos que a simulação, semelhante às outras metodologias científicas apenas nos servira para nos aproximar da verdade e que os seus

pontos fracos se encontram muito mais relacionados com o modelo conceitual ou com o experimentador do que com o método em si.

Objetivando dar um caráter mais científico às simulações apresentadas neste trabalho procuramos seguir os passos sugeridos pela ferramenta TRACE e documentar da melhor forma possível o modelo pelo protocolo ODD.

Concluimos que bem diferente do que uma simples formalidade, estas duas ferramentas exigiram que pensássemos no modelo e no seu processo de concepção e construção, também nos possibilitou a identificação de possíveis falhas no modelo conceitual e no nosso modelo *in silico*.

Com o modelo verificado, pudemos dar andamento às simulações.

Restringimos a nossa análise a três condições: a) jogadas simultâneas e alternadas, b) incerteza da continuidade da díade ou da relação e c) presença e ausência de ruído.

Como já fizemos uma ampla discussão dos resultados no capítulo anterior, iremos apenas nos restringir aos principais pontos procurando relacioná-los com os objetivos da pesquisa.

É importante frisar que os resultados desta pesquisa são próprios para os nossos torneios. Assim, seria possível obter, talvez, resultados diversos daqueles que nos apresentamos mediante a combinação adequada de outras estratégias. Essa observação é válida para qualquer torneio de estratégias, mesmo porque o objetivo da simulação não é obter a verdade final, mas de fornecer *insights* sobre como seria esta verdade.

Outro ponto que merece ser destacado é que apesar de estarmos lidando com estratégias “estáticas” num jogo, subjacente a cada uma dessas estratégias encontra-se uma regra de comportamento. Desta maneira, conciliar as estratégias RTS e LRS é equivalente a se perguntar: Num dilema do prisioneiro contínuo e iterado devemos sempre “testar o terreno” ou podemos “mergulhar de cabeça” na relação?

As principais conclusões da nossa pesquisa são:

- Estratégias prudentes se mostraram melhores do que as estratégias cooperativas em jogos simultâneos e para valores de w próximos a 0,4. A ideia é que ser mais prudentes nestes casos serviria para compensar a falta de informação sobre o

oponente e a baixa perspectiva de existirem rodadas adicionais. É interessante observar, no caso simultâneo, como o aumento do parâmetro w afetou as estratégias vencedoras do nosso torneio. Pudemos observar, na sequência, um predomínio da estratégia ALLD, RTS, LRS e TFT. Este resultado concilia a estratégia RTS e a LRS no caso simultâneo.

- O jogo alternado em comparação com o jogo simultâneo tende a favorecer estratégias cooperativas e generosas, enquanto tende a desfavorecer estratégias prudentes e não cooperativas. A razão para isto é o ganho informacional. Em termos práticos, como conhecemos um pouco mais sobre o nosso oponente, menores serão os ganhos obtidos se comportando de uma forma prudente. No caso simultâneo, como não sabemos nada sobre o nosso oponente, ser prudente neste caso significa justamente incorrer num pequeno custo para poder conhecê-lo melhor, algo desnecessário no caso alternado. Este resultado concilia a estratégia RTS e a LRS no caso alternado.
- Atuar de acordo com a estratégia LRS ou mergulhar de cabeça na relação foi melhor, tanto no caso simultâneo quanto alternado, para valores do parâmetro w entre 0,65 e 0,90;
- Para valores de $w=0,95$ nos jogos sem ruído, a estratégia TFT mostrou-se a grande vencedora, pois foi a única que conseguiu colher os frutos de um cenário com um alto valor de w , mas sem correr o risco de ser explorada pela estratégia ALLD;
- Observamos que a presença de ruído dificultou que estratégias generosas e prudentes pudessem prosperar ao serem confrontadas com a estratégia não cooperativas ALLD. Isso ocorreu tanto para jogadas simultâneas quanto alternadas. No caso alternado, a estratégia LRS conseguiu ter um desempenho superior ao ser comparada com a estratégia TFT. Atribuímos a isto a sua característica de otimismo. Ser otimista permite que ela seja mais resistente a erros e possibilita o rápido restabelecimento da cooperação para um patamar anterior a ocorrência do erro.

Uma análise de estratégias evolutivamente estáveis talvez pudesse complementar os nossos resultados e servisse para conciliar as estratégias RTS e LRS com a ideia de EEE na presença de ruído.

Limitações sobre a quantidade de experimentos realizados para cada cenário também devem ser considerados.

No geral, acreditamos que as conclusões apresentadas respondem as principais perguntas do trabalho e nos ajudam a entender uma parte não muito clara relacionada ao dilema do prisioneiro contínuo e iterado.

Esperamos que as contribuições desta pesquisa possam melhorar o entendimento sobre alguns aspectos da evolução da cooperação entre quaisquer organismos.

Temos em mente que o problema da cooperação é um tema de pesquisa que perdurará por muitos anos ainda. Muito mais do que os 25 anos projetados pela revista *Science*.

Neste ponto, como ensina Nowak e Sigmund (1994, p. 226), “o dilema não tem fim.”

19. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramo, P. (1988). Pesquisa em ciências sociais. In: Hirano, S. (Org.), *Pesquisa Social: projeto e planejamento* (2a ed.). São Paulo: T. A. Queiroz, p. 23-88.
- Alencar, A. I.; Siqueira, J. O. & Yamamoto, M. E. (2008). Does group size matter? Cheating and cooperation in Brazilian school children. *Evolution and Human Behavior*, 29 (1), 42-48.
- Alencar, A. I. & Yamamoto, M. E. (2008). A teoria dos jogos como metodologia de investigação científica para a cooperação na perspectiva da psicologia evolucionista. *Psico*, 39 (4), 522-529.
- Apicella, C. L., Marlowe, F. W., Fowler, J. H. & Christakis, N. A. (2012) Social networks and cooperation in hunter-gatherers. *Nature*, 481, 497-501.
- Augusiak, J., Van den Brink, P. J. & Grimm, V. (2014) Merging validation and evaluation of ecological models to ‘evaluation’: A review of terminology and practical approach. *Ecological Modelling*, 280, 117-128.
- Aumann, R. J. (1959). Acceptable Points in General Cooperative n-Person Games. In Luce, R. D. & Tucker, A. W. (Eds), *Contributions to the Theory of Games IV, Annals of Mathematics Studies 40*, Princeton, NJ : Princeton University Press, p. 287–324.
- Axelrod, R.M. & Hamilton, W. D. (1981). The evolution of cooperation in biological systems. *Science*, 211 (4489), 1390-1396.
- Axelrod, R.M. (1997). *The complexity of cooperation – Agent-based models of competition and collaboration*. New Jersey: Princeton University Press.
- Axelrod, R.M. (2006). *The evolution of cooperation, revised edition*. New York: Basic Books.
- Barlas, Y., Carpenter, S. (1990). Philosophical roots of model validation: two paradigms. *System Dynamics Review*, 6, 148 -166.
- Barrett, L.; Henzi, S. P.; Weingrill, T.; Lycett, J. E. & Hill, R. A. (2000). Female baboons do not raise the stakes but they give as good as they get. *Animal Behaviour*, 59, 763-770.
- Becker, G. (1970, Feb.). Irrational Behavior and Economic Theory. *The Journal of Political Economy*, 70 (1), 1-13.
- Bergh, B. V. den & Dewitte, S. (2006). The robustness of the “Raise-the-Stakes” strategy Coping with exploitation in noisy Prisoner’s Dilemma Games. *Evolution and Human Behavior*, 27, 19-28.
- Bshary, R. (2002). Building up relationships in asymmetric co-operation games between the cleaner wrasse *Labroides dimidiatus* and client reef fish. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 52, 365-371.
- Bierman, H. S., & Fernandez, L. (2011). *Teoria dos Jogos* (2a ed.). São Paulo: Pearson Education do Brasil.
- Blocher, J. (2009, Jan.). *Reputation as property in virtual economies*, 118 Yale Law Journal Pocket Part 120, <http://thepocketpart.org/2009/01/19/blocher.html>.

Bonacich, P.; Shure, G. H.; Kahan, J. P. & Meeker, R.T. (1976). Cooperation and Group Size in the N-Person Prisoners' Dilemma. *The Journal of Conflict Resolution*, 20 (3), 687-706.

Bowles, S. (2004). *Microeconomics, Behavior, Institutions and Evolution*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Bowles, S. & Gintis, H. (2004). The evolution of strong reciprocity: cooperation in heterogeneous populations. *Theoretical Population Biology*, 65 (1), 17-28.

Boyd, R. & Richerson, P. J. (1988, Jun.). The Evolution of Reciprocity in Sizable Groups. *Journal of Theoretical Biology*, 132 (3), 337-356.

Boyd, R. & Richerson, P. J. (2002, Apr.). Group beneficial norms can spread rapidly in a structured population. *Journal of Theoretical Biology*, 215 (3), 287-296.

Burton-Chellew, M. N., Ross-Gillespie, A. & West, S. A. (2010, Mar.). Cooperation in humans: competition between groups and proximate emotions. *Evolution and Human Behavior*, 31 (2), 104-108.

Colman, A. M. (2003). Cooperation, psychological game theory, and limitations of rationality in social interaction. *Behavioral and Brain Sciences*, 26, 139-198.

Comparison of agent-based modeling software. Acessado em 03 de abril de 2015, de http://http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_agent-based_modeling_software

Connor, R. C. (1995). Impala allogrooming and the parceling model of reciprocity. *Animal Behavior*, 49, 528-530.

Darwin, C. (1996) . *The origin of species*. New York: Oxford University Press.

Demetrius, L. e Gundlach, V. M. (2000, Nov.) Game theory and evolution: finite size and absolute fitness measures. *Mathematical Biosciences*, 168 (1), 9 -38.

Demetrius, L. & Zieh, M. (2007, Nov.). Darwinian fitness. *Theoretical Population Biology*, 72 (3), 323 – 345.

Dixit, A. K., & Nalebuff, B. L. (1993). *Thinking Strategically: The competitive edge in Business, politics, and everyday life*. New York: W. W. Norton & Company.

Doebeli, M. & Knowlton, N. (1998). The evolution of interspecific mutualisms. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 95, 9676-8680.

Dugatkin, L. A. (2006). *The Altruism Equation: Seven Scientists Search for the Origins of Goodness*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Felipe, E. S. (2008, setembro/dezembro). Racionalidade limitada e modelos mentais: aspectos cognitivos dos agentes econômicos na economia institucionalista. *Revista de Economia*, 34 (3), 141-163.

Fiani, R. (2009) *Teoria dos Jogos* (3a ed.). Rio de Janeiro: Elsevier Editora.

Fiani, R. (2011). *Cooperação e Conflito: Instituições e Desenvolvimento Econômico*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora.

Fisher, R. A. (1930). *The Genetical Theory of Natural Selection*. Oxford: The Clarendon Press.

- Frank, S. A. (1998). *Foundations of Social Evolution*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Frazen, A. (1995). Group Size and One-Shot Collective Action. *Rationality and Society*, 7 (2), 183-200.
- Frean, M. (1996). The Evolution of Degrees of Cooperation. *Journal of Theoretical Biology*, 182, 549-559.
- Funderberg, D. & Levine, D. K. (1998). *The Theory of Learning in Games*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gracia-Lázaro, C., Ferrer, A., Ruiz, G., Tarancón, A. Cuesta, J. A., Sánchez, A. & Moreno, Y. Heterogeneous networks do not promote cooperation when humans play a prisoner's dilemma. *PNAS*, 109 (32), 12922-12926.
- Gilbert, N. & Troitzsch, K. G. (2005). *Simulation for the Social Scientist* (2nd ed.). Berkshire, England: Open University Press.
- Gintis, H. (2009). *Game theory evolving: a problem-centered introduction to modeling strategic interaction* (2nd ed.). New Jersey: Princeton University Press.
- Gopen, G.D. & Swan, J.A. (1990) The science of scientific writing. *American Scientist*, 78, 550-558.
- Grant, V. (1977). *Organismic Evolution*. San Francisco: W. H. Freeman.
- Grimm, V., Augusiak, J., Focks, A., Frank, B. M., Gabsi, F., Johnston, A. S. A., Liu, C., Martin, B. T., Meli, M., Radchuk, V., Thorbek, P. & Railsback, S. F. (2014). Towards better modelling and decision support: Documenting model development, testing, and analysis using TRACE. *Ecological Modelling* 280, 129-139.
- Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., Goss-Custard, J., Grand, T., Heinz, S., Huse, G., Huth, A., Jepsen, J. U., Jørgensen, C., Mooij, W. M., Müller, B., Pe'er, G., Piou, C., Railsback, S. F., Robbins, A. M., Robbins, M. M., Rossmannith, E., Rüger, N., Strand, E., Souissi, S., Stillman, R. A., Vabø, R., Visser, U. & DeAngelis, D. L. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling* 198, 115-126.
- Grimm, V., Railsback, S. F. (2005). *Individual-Based Modeling and Ecology*. Princeton: Princeton University Press.
- Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J. & Railsback, S. F. (2010). The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling* 221, 2760-2768.
- Grüne-Yanoff, T. & Weirich, P. (2010). The Philosophy and Epistemology of Simulation: A review. *Simulation & Gaming*, 41 (1) 20-50.
- Hamilton, W. D. (1964). The Genetical Evolution of Social Behaviour I and II. *Journal of Theoretical Biology*, 7 (1) , 1-16 e 17-52.
- Hamilton, W. D. (1967) Extraordinary sex ratios. *Science*, 156, 477-88.

- Hammerstein, P. (2001). Games and markets: economic behaviour in humans and other animals. In Noë, R., Van Hoof, J. A. R. A. M. & Hammerstein, P. (Eds.), *Economics in Nature: Social Dilemmas, Mates Choice e Biological Markets*. New York: Cambridge University Press, p. 1–19
- Hammerstein, P. & Selten, R. (1994). Game theory and evolutionary biology. In Auman, R. & Hart, S. (Eds.), *Handbook of Game Theory with Economic Applications*, Vol. 2. Amsterdam: Elsevier, p. 929-93.
- Hardin, G. (1968). The Tragedy of the Commons. *Science*, 162, 1243-1248.
- Hargreaves-Heap, S. P. & Varoufakis, Y. (2004). *Game Theory – A Critical Introduction* (2a ed.). London: Routledge.
- Hartmann, S. (1996). The world as a process: Simulations in the natural and social sciences. In Hegselmann, R., Mueller, U. & Troitzsch, K. (Eds), *Modelling and simulation in the social sciences from the philosophy of science point of view*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer, p. 77-100.
- Hauert, C., Michor, F., Nowak, M. A. & Doebeli, M. (2006). Synergy and discounting of cooperation in social dilemmas. *Journal of Theoretical Biology*, 239 (2), 195 – 202.
- Hausken, K. (2000, Jul.). Cooperation and between-group competition. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 42 (3), 417-425.
- Henrich, J. (2004, Jan.). Cultural group selection, coevolutionary processes and large-scale cooperation. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 53 (1), 3-35.
- Henrich, N. & Henrich, J. (2007). *Why Human Cooperate, A cultural e evolutionary explication*. New York: Oxford University Press.
- Holling, C. S. (1978). *Adaptive Environmental Assessment and Management*. New York: John Wiley & Sons.
- Kepler conjecture. (2015, 21 de janeiro). In *Wikipédia: a enciclopédia livre*. Recuperado de http://en.wikipedia.org/wiki/Kepler_conjecture
- Kerr, B. & Godfrey-Smith, P. (2002). Individualist and Multi-level perspective on selection in structured populations. *Biology and Philosophy*, 17, 477-517.
- Killingback, T. & Doebeli, M. (1999). 'Raise the stakes' evolves into a defector. *Nature*, 400, 518.
- Lazzarini, S. G., Madalozzo, R., Artes, R. & Siqueira, J. O. (2005). Measuring Trust: Na Experiment in Brazil. *Economia Aplicada*, 9 (2), 153-169.
- Le, S. & Boyd, R. (2007). Evolutionary dynamics of the continuous iterated Prisoner's dilemma. *Journal of Theoretical Biology*, 245, 258-267.
- Lesourne, J., Orléan, A. & Walliser, B. *Evolutionary MicroEconomics*. Berlin: Springer, 2002.
- Lorek, H., Sonnenschein, M. (1999). Modelling and simulation software to support individual-oriented ecological modelling, *Ecological Modelling* 115, 199-216.

- Luce, R. D. & Raiffa, H. (1957). *Games e Decisions: Introduction and Critical Survey*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- McNamara, L., Trucano, T. & Backus, G. (2007). *Verification and Validation as Applied Epistemology*. In: Proceedings of UCLA Conference on Human Complex Systems. <http://hcs.ucla.edu/arrowhead.htm>
- Mar, G. & St. Denis, P. (1994). Chaos in Cooperation: Continuous-valued prisoner's dilemmas in infinite-valued logic. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 04 (04), 943-958.
- Mas-Colell, A., Whinston, M. D. & Green, J. R. (1995). *Microeconomic Theory*. New York: Oxford University Press.
- Maynard Smith, J. (1982). *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Maynard Smith, J. & Price, G. R. (1973). The logic of animal conflict. *Nature*, 246, 15-18.
- McElreath, R. & Boyd, R. (2007). *Mathematical Models of Social Evolution, A guide for the perplexed*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Mesterton-Gibbons, M. (1992). On the Iterated Prisoner's Dilemma in a Finite Population. *Bulletin of Mathematical Biology*, Vol. 54, No. 2/3, 423-443.
- Milinski, M. (1987). Tit for Tat in sticklebacks and the evolution of cooperation. *Nature*, 325, 434-435.
- Mills, K. M. & Beatty, J. H. (2006). The propensity interpretation of Fitness. In E. Sober (Ed.), *Conceptual Issues in Evolutionary Biology* (3rd ed.). Cambridge, MA: MIT Press, p. 3-24.
- Moore, D. & Bazerman, M. H. (2010). *Processo decisório (7a ed.)*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- NetLogo itself: Wilensky, U. 1999. *NetLogo*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Evanston, IL.
- Nowak, M. A. (2012). Evolving Cooperation. *Journal of Theoretical Biology*, 299, 1-8.
- Nowak, M. A. & Highfield, R. (2011). *SuperCooperators: Altruism, Evolution and why we need each other to succeed*. New York: Free Press.
- Nowak, M. A. & May, R. M. (1992). Evolutionary Games and Spatial Chaos. *Nature*, 359, 826 - 829.
- Nowak, M. A. & Sigmund, K. (1992). Tit for tat in heterogeneous populations. *Nature*, 355, 250 - 253.
- Nowak, M. A. & Sigmund, K. (1993). A strategy of win-stay, lose-shift that outperforms Tit-for-Tat in the Prisoner's Dilemma game. *Nature*, 364, 56 - 58.
- Nowak, M. A. & Sigmund, K. (1994). The alternating prisoner's dilemma. *Journal of Theoretical Biology*, 168, 219 - 226.
- Nowak, M. A. & Sigmund, K. (1998). Evolution of Indirect reciprocity by image scoring. *Nature*, 393, 573 - 577.

- Nowak, M. A. & Sigmund, K. (1998). The Dynamics of Indirect Reciprocity. *Journal of Theoretical Biology*, 194, 561 - 574.
- Nowak, M. A. (2006a). *Evolutionary Dynamics – Exploring the equations of life*. Canada: The belknap press of Havard University Press.
- Nowak, M. A. (2006b). *Five rules for the evolution of cooperation*. *Science*, 314, 1560-1563.
- Nowak, M. A. & Sigmund, K. (2007). How populations cohere: five rules of cooperation. In May, R. & McLean, A. (Eds.), *Theoretical Ecology – Principles and Applications* (3rd ed.). New York: Oxford University Press, p. 7-16.
- Nowak, M. A., Tarnita, C. & Wilson, E. O. (2010). The evolution of eusociality. *Nature*, 466, 1057-1062.
- Ohtsuki, H., Hauert, C., Lieberman, E. & Nowak, M. A. (2006). A simple rule for evolution of cooperation on graphs and social networks. *Nature*, 441, 502-505.
- Ohtsuki, H. & Iwasa, Y. (2004). How should we define goodness? – Reputation dynamics in indirect reciprocity. *Journal of Theoretical Biology*, 231 (1), 107-120.
- Ohtsuki, H. & Iwasa, Y. (2006). The leading eight: Social norms that can maintain cooperation by indirect reciprocity. *Journal of Theoretical Biology*, 239, 435-444.
- Oreske, N., Belitz, K., Sharader-Frechette, K., Sterman, J. D., Rykiel, E.J.J. (1994). The meaning of models. *Science*, 264, 331.
- Ormerod, P., Rosewell, B. (2009) Validation and verification of agent-based models in the social sciences. In: Squazzoni, F. (Ed.), *Epistemological Aspect of Computer Simulation in the Social Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp.130–140.
- O’Sullivan, D. & Perry, G. L. W. (2013). *Spatial Simulation – Exploring Pattern and Process*. West Sussex, United Kingdom: Wiley-Blackwell.
- Panchanathan, K. & Boyd, R. (2003). A tale of two defectors: the importance of standing for evolution of indirect reciprocity. *Journal of Theoretical Biology*, 224, 115-126.
- Panchanathan, K. & Boyd, R. (2004). Indirect reciprocity can stabilize cooperation without the second-order free rider problem. *Nature*, 432, 499-502.
- Park, C. S. & Sharp-Bette, G. P. (1990). *Advanced Engineering Economics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Parunak, H. V. D., Savit, R. & Riolo, R. (1998). Agent-based modeling vs. equation-based modeling: A case study and users’ guide. *Workshop on Multi_Agent Systems and Agent-Based Simulation (MABS’ 98)*. Springer.
- Peck, S. L. (2004). Simulation as experiment: a philosophical reassessment for biological modeling. *TRENDS in Ecology and Evolution*, 19 (10), 530 – 534.
- Pereira, M. A. (2008). *Dilema do Prisioneiro Evolucionário Darwiniano e Pavloviano no Autômato Celular Unidimensional: uma nova representação e exploração exaustiva do espaço de parâmetros*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo.

- Pfeiffer, T.; Tran, L.; Krumme, C. & Rand, D. G. (2012). The value of reputation. *Journal of the Royal Society Interface*, 9 (76), 2791-2797.
- Pilch, M., Trucano, T., Moya, J., Froehlich, G., Hodges, A. & Peercy, D. (2000). *Guidelines for Sandia ASCI Verification and Validation Plans – Content and Format: Version 2.0*. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, SAND2000-3101.
- Pilkey, O. H., Pilkey-Jarvis, L. (2007). *Useless Arithmetic: Why Environmental Scientists Can't Predict the Future*. New York: Columbia University Press.
- Pindyck, R. S. & Rubinfeld, D. L. (1995). *Microeconomics* (3rd ed.). New Jersey: Prentice-Hall International.
- Pindyck, R. S. & Rubinfeld, D. L. (2009). *Microeconomics* (7rd ed.). New Jersey: Prentice-Hall International.
- Polhill, J., Brown, D. & Grimm, V. (2008). Using the ODD protocol for describing three agent-based social simulation models of land use change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11, 3, <http://jass.soc.surrey.ac.uk/11/2/3.html>.
- Popper, K. (1959). *The Logic of Scientific Discovery*. London: Hutchingson & Co.
- Puurtinen, M. & Mappes, T. (2009). Between-group competition and human cooperation. *Proc. R. Soc. B.*, 276 (1655), 355-360.
- Railsback, S. F. (2001). Concepts from complex adaptive system as a framework for individual-based modelling. *Ecological Modelling*, 139, 47-62.
- Railsback, S. F. & Grimm, V. (2012). *Agent-Based and Individual-Based Modeling – A Practical Introduction*. New Jersey: Princenton University Press.
- Rand, D. G. & Nowak, M. A. (2013, Aug.). Human Cooperation. *Trends in Cognitive Sciences*, 17 (8), 413-425.
- Rasmusen, E. (2001) *Games & Information – An introduction to game theory* (3rd ed.). Malden, MA: Blackwell Publishing.
- Rykiel, E.J.J. (1996). Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling*, 90, 229-244.
- Roberts, G. & Renwick, J. S. (2003). The development of cooperative relationships: an experiment. *Proc. R. Soc. Lon. B.* 270, 2279-2283.
- Roberts, G. & Sherratt, T. N. (1998). Development of cooperative relationships through increasing investment. *Nature*, 394, 175-179.
- Roff, D. A. (2010). *Modeling Evolution – An Introduction to numerical methods*. New York: Oxford University Press.
- Romp, G. (1997). *Game Theory – Introduction and Applications*. New York: Oxford University Press.
- Samuelson, L. (1997). *Evolutionary Games and Equilibrium Selection*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Schelling, Thomas C. (1958). Prospectus for a Re-orientation of Game Theory. *Journal of Conflict Resolution*, 2 (3), 203-264.
- Schelling, T. C. (1980). *The Strategy of Conflict*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Sherratt, T. N. & Roberts, G. (1999a). Raise the stakes evolves into a defector. Reply. *Nature*, 400, 518.
- Sherratt, T. N. & Roberts, G. (1999b). The Evolution of Quantitatively Responsive Cooperative Trade. *Journal of Theoretical Biology*, 200, 419-426.
- Sherratt, T. N. & Roberts, G. (2002). The Stability of cooperation involving variable investment. *Journal of Theoretical Biology*, 215, 47-56.
- Simon, H. (1957). *Models of man: Social and rational mathematical essays on rational human behavior in a social setting*. New York: John Wiley and Sons.
- Simon, H. (1978, May). Rationality as a process and as a product of thought. *The American Economic Review*, 68 (2), 1-16.
- Simon, H. (1979, Sep.). Rationality decision making in business organizations. *The American Economic Review*, 69 (4), 493-513.
- Siqueira, J. O. & Santos, E. B. *Measuring Risk Preferences in Financial Applications*. Artigo em preparação.
- Schmolke, A., Thorbek, P., DeAngelis, D. L. & Grimm, V. (2010). Ecological models supporting environmental decision making: a strategy for the future. *Trends in Ecology and Evolution*, 25, 479-486.
- Standifird, S. S. (2001, May). Reputation and e-commerce: eBay auctions and the asymmetrical impact of positive and negative ratings. *Journal of Management*, 27 (3), 279-295.
- Starfield, A. M., Smith, K. A. & Bleloch, A. L. (1990). *How to model it: Problem solving for the computer age*. New York: McGraw-Hill.
- Taleb, N. N. (2008). *A lógica do cisne negro – O impacto do altamente improvável*. Rio de Janeiro: Editora BestSeller.
- Tennie, C., Frith, U. & Frith, C. D. (2010). Reputation management in the age of the world-wide web. *Trends in Cognitive Sciences*, 14 (11), 482-488.
- Traulsen, A. & Nowak, M. A. (2006). Evolution of cooperation by multilevel selection. *PNAS*, 103 (29), 10952-10955.
- Trivers, R. L. (1971). The Evolution of Reciprocal Altruism. *Quarterly Journal of Biology*, 46 (1), 35-57.
- Van Assen, M.A.L.M., & Snijders, C. (2004). Effects of risk preferences in social dilemmas: a game-theoretical analysis and evidence from two experiments. In Ramzi, Suleiman, Budescu, Fischer & Messick (Eds.), *Contemporary Psychological Research on Social Dilemmas*, Cambridge University Press, p. 24-57.

- Verhoeff, T. (1993). *The Trader's Dilemma: A continuous version of the prisoner's dilemma*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology (também disponível em: <http://www.win.tue.nl/~wstomv/publications/td.pdf>)
- Wahl, L. M. & Nowak, M. (1999a). The Continuous Prisoner's Dilemma: I. Linear Reactive Strategies. *Journal of Theoretical Biology*, 200, 307-321.
- Wahl, L. M. & Nowak, M. (1999b). The Continuous Prisoner's Dilemma: II. Linear Reactive Strategies with Noise. *Journal of Theoretical Biology*, 200, 323-338.
- Waddington, C. H. (1968). *Towards a Theoretical Biology*, vol. 1. Edinburgh, UK: Edinburgh University Press.
- Weibull, J. W. (1997). *Evolutionary Game Theory*. Cambridge, MA: MIT Press.
- West, S.A., Griffin, A. S. & Gardner, A. (2006). Social semantics: altruism, cooperation, mutualism, strong reciprocity and group selection. *Journal of Evolutionary Biology*, 20 (2), 415-432.
- Wilensky, U & Rand, W. (2015). *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Williams, G. C. (1966). *Adaptation and natural selection: A critique of some current evolutionary thought*. New Jersey: Princeton University Press.
- Williams, M. B. (1970). Deducing the Consequences of Evolution: A Mathematical Model. *Journal of Theoretical Biology*, 29 (3), 343-385.
- Williamson, O. E. (1979, Oct.). Transaction-Cost Economics: The Governance of Contractual Relations. *Journal of Law and Economics*, 22 (2), 233-261.
- Williamson, O. E. (1981a, Nov.). The Economics of Organization: The Transaction Cost Approach. *American Journal of Sociology*, 87 (3), 548-577.
- Williamson, O. E. (1981b, Dec.). The Modern Corporation: Origins, Evolution, Attributes. *Journal of Economic Literature*, 19 (4), 1537-1568.
- Wilson, W. G. (1998). Resolving Discrepancies between Deterministic Population Models and Individual-Based Simulations. *The American Naturalist*, 151 (2), 116 – 134.
- Winsberg, E. (2003). Simulated experiments: methodology for a virtual world. *Philosophy of Science*, 70, 105-125.
- Wynne-Edwards, V. C. (1967) *Animal Dispersion in Relation to Social Behavior*. Edinburgh, UK: Oliver and Boyd.

20. APÊNDICE A – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES SELECIONADAS

- Equação 32

$$W(TFT) > W(ALLD)$$

$$W_0 + h \left(\frac{b-c}{1-w} \right) - (1-h)c > w_0 + h.b$$

$$1 \left(\frac{b-c}{1-w} \right) - (1-1)c > 1b$$

$$\frac{b-c}{1-w} > b$$

- Equação 49

$$(i+1)V(C|i+1) + (n-i-1)V(D|i+1) > iV(C|i) + (n-i)V(D|i)$$

$$(i+1)V(C|i+1) - iV(C|i) > (n-i)V(D|i) - (n-i-1)V(D|i+1)$$

$$(i+1) \left(\frac{B}{n}(i+1) - c \right) - i \left(\frac{B}{n}i - c \right) > (n-i) \left(\frac{B}{n}i \right) - (n-i-1) \left(\frac{B}{n}(1+i) \right)$$

$$B > c$$

- Equação 56

$$V(G3|G3) > V(ALLD|G3)$$

$$\frac{b-c}{1-w} - \frac{2}{3}(b-c) > \frac{1}{3}b$$

$$(b-c) \left(\frac{1}{1-w} - \frac{2}{3} \right) > \frac{1}{3}b$$

$$(b-c) \left(\frac{3-2+2w}{3(1-w)} \right) > \frac{1}{3}b$$

$$(b-c) \left(\frac{1+2w}{3(1-w)} \right) > \frac{1}{3}b$$

$$(b-c) \left(\frac{1+2w}{(1-w)} \right) > b$$

$$(b-c)(1+2w) > b(1-w)$$

$$b + 2bw - c - 2cw > b - bw$$

$$2bw - c - 2cw > -bw$$

$$3bw - 2cw > c$$

$$w > \frac{c}{3b-2c}$$

- Equação 60

$$V(Gn | Gn) > V(ALLD | Gn)$$

$$\frac{b-c}{1-w} - \frac{n-1}{n}(b-c) > \frac{b}{n}$$

$$(b-c) \left(\frac{1}{1-w} - \frac{n-1}{n} \right) > \frac{b}{n}$$

$$(b-c) \left(\frac{n-(n-1)(1-w)}{n(1-w)} \right) > \frac{b}{n}$$

$$(b-c) \left(\frac{n-(n-nw-1+w)}{n(1-w)} \right) > \frac{b}{n}$$

$$(b-c) \left(\frac{n-n+nw+1-w}{n(1-w)} \right) > \frac{b}{n}$$

$$(b-c) \left(\frac{nw+1-w}{n(1-w)} \right) > \frac{b}{n}$$

$$(b-c) \left(\frac{nw+1-w}{(1-w)} \right) > b$$

$$(b-c)(nw-w+1) > b(1-w)$$

$$bnw-bw+b-cnw+cw-c > b-bw$$

$$bnw-cnw+cw-c > 0$$

$$w > \frac{c}{nb-(n-1)c}$$

- Equação 61

$$\frac{c}{(n)b-c(n-1)} < \frac{c}{(n-1)b-c((n-1)-1)}$$

$$\frac{c}{(n)b-c(n-1)} < \frac{c}{(n-1)b-c(n-2)}$$

$$(n-1)b-c(n-2) < (n)b-c(n-1)$$

$$nb-b-cn+2c < nb-cn+c$$

$$-b+2c < +c$$

$$c < b$$

21. APÊNDICE B – DETALHANDO A REGRA DE HAMILTON

Para entender melhor como funciona o mecanismo da seleção de parentesco na promoção da cooperação, vamos considerar o seguinte jogo evolutivo: Imagine uma grande população haploide em que existam dois tipos de estratégias: cooperar (C) e não cooperar (D). A frequência de cooperadores nesta população é igual a h , e conseqüentemente, a de não cooperadores $1-h$. Indivíduos que são cooperadores permanecerão cooperadores ao longo da sua vida, o mesmo vale para os não cooperadores. Admita que os indivíduos nesta população joguem o dilema do prisioneiro de dois jogadores, sendo que cada par é selecionado aleatoriamente. O ato cooperativo implica numa redução de c da aptidão do cooperador; em contrapartida, o receptor da cooperação ou aquele que foi ajudado, acabará tendo um impacto positivo de b na sua aptidão, sendo que $b > c > 0$.

A representação matricial deste jogo pode ser observada abaixo:

		Coluna	
		Cooperar (C)	Não Cooperar (D)
Linha	Cooperar (C)	$b-c ; b-c$	$-c ; b$
	Não Cooperar (D)	$b ; c$	$-c ; -c$

Portanto, a aptidão esperada para cada uma dessas estratégias neste cenário seria:

$$W(C) = W_0 + P(C|C)V(C|C) + P(D|C)V(C|D)$$

$$W(D) = W_0 + P(C|D)V(D|C) + P(D|D)V(D|D)$$

Sendo que:

W_0 representa uma aptidão basal, sendo igual para os dois jogadores;

$P(E_2|E_1)$ é uma probabilidade condicional, i.e., dada uma estratégia E_1 , desta estratégia interagir com uma estratégia E_2 .

Substituindo os dados do exemplo nas funções de aptidão esperada, temos:

$$W(C) = W_0 + P(C|C)V(C|C) + P(D|C)V(C|D)$$

$$W(C) = W_0 + h(b-c) + (1-h)(-c)$$

$$W(C) = W_0 + hb - c$$

$$W(D) = W_0 + P(C|D)V(D|C) + P(D|D)V(D|D)$$

$$W(D) = W_0 + hb + (1-h)0$$

$$W(D) = W_0 + hb$$

É fácil verificar que a aptidão esperada de um não cooperador $W(D)$ será sempre maior do que a aptidão esperada de um cooperador $W(C)$ e, portanto, neste caso, a cooperação não evoluiria, pois os não cooperadores aumentariam a sua frequência ao longo do tempo, enquanto, a frequência de cooperadores se reduziria. De certa forma, este resultado já era esperado.

Mas o que aconteceria se os pares não fossem formados ao acaso, ou, em outras palavras, se o cooperador pudesse escolher com quem interagir. Ele poderia, por exemplo, mediante algumas pistas tentar identificar os cooperadores entre os não cooperadores. Para tornar isso concreto, admita agora que os organismos tenham uma chance r ($0 \leq r \leq 1$) de compartilharem o mesmo alelo (mesma estratégia) por uma descendência comum, por parentesco. Isso implica que agora o nosso cooperador não estaria totalmente fadado ao total acaso para encontrar outro cooperador. Como isso se refletiria nas probabilidades de encontro entre as estratégias?

Dado que o nosso organismo focal seja um cooperador, ao escolher outro organismo na população, haveria uma chance r de ambos por descendência comum compartilharem o mesmo alelo (mesma estratégia) e, se isso ocorrer, a chance deste indivíduo ser cooperador também seria 100%, e de ser não cooperador, de 0%. Se o indivíduo escolhido não possuir descendência comum com o organismo focal, isso ocorre com uma chance de $1-r$. Mesmo assim, haveria a chance dele ser um cooperador com uma probabilidade h , que nada mais é do que a frequência de cooperadores na população, e de não ser cooperador com uma probabilidade, $1-h$.

Logo, as probabilidades de um cooperador interagir com outro cooperador ou com um não cooperador, neste caso, seriam:

$$P(C|C) = r + (1-r)h$$

$$P(C|C) = r + (1-r)h$$

$$P(D|C) = r \cdot 0 + (1-r)(1-h)$$

$$P(D|C) = (1-r)(1-h)$$

$$P(D|C) = (1-r) - (1-r)h$$

Observe que ao acrescentarmos a chance r , acabamos aumentando a probabilidade de um cooperador poder encontrar outro cooperador, pois:

$$P(C|C)_{\text{com descendência comum}} > P(C|C)_{\text{sem descendência comum}}$$

$$r + (1-r)h > h$$

$$r + h - rh > h$$

$$r(1-h) > 0$$

Se $r > 0$ e $0 < h < 1$, então esta inequação é sempre verdadeira.

Vamos fazer a mesma análise com um não cooperador. Neste caso as probabilidades de um não cooperador interagir com outro não cooperador ou com um cooperador seriam:

$$P(C|D) = r + (1-r)h$$

$$P(C|D) = (1-r)h$$

$$P(D|D) = r + (1-r)(1-h)$$

$$P(D|D) = r + (1-r)(1-h)$$

$$P(D|D) = r + 1 - r - (1-r)h$$

$$P(D|D) = 1 - (1-r)h$$

Então, as funções de aptidão esperada para cada estratégia seriam:

$$W(C) = W_0 + P(C|C)V(C|C) + P(D|C)V(C|D)$$

$$W(C) = W_0 + P(C|C)(b-c) + (1-P(C|C))(-c)$$

$$W(C) = W_0 + bP(C|C) - cP(C|C) - c + cP(C|C)$$

$$W(C) = W_0 + bP(C|C) - c$$

$$W(D) = W_0 + P(C|D)V(D|C) + P(D|D)V(D|D)$$

$$W(D) = W_0 + P(C|D)b + P(D|D)0$$

$$W(D) = W_0 + bP(C|D)$$

Portanto, haverá a propagação da cooperação se:

$$W(C) > W(D)$$

$$W_0 + bP(C|C) - c > W_0 + bP(C|D)$$

$$b(P(C|C) - P(C|D)) > c$$

$$b(r + (1-r)h - (1-r)h) > c$$

$$b(r + h - rh - h + rh) > c$$

$$rb > c$$

Da inequação acima, percebe-se que a diferença $P(C|C) - P(C|D)$ reduz-se simplesmente à chance r . Observa-se também que uma condição mínima e necessária para que a cooperação possa evoluir é que essa diferença de probabilidades seja um valor maior do que zero, i.e., a chance de um cooperador interagir com outro cooperador tem que ser maior do que o mesmo cooperador interagir com um não cooperador. Assim, se essa chance r for igual a zero, o valor de b poderia ser muito maior do que o valor de c , e mesmo assim, não teríamos a

cooperação. Porém, se r for ligeiramente maior do que zero, então estaremos conseguindo dar um “empurrãozinho” para a evolução da cooperação.

22. APÊNDICE C – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO QUADRO 14

- a) Frequência mínima de TFT necessária para uma população de TFT invadir uma população de ALLD no caso do jogo alternado

As recompensas esperadas da iteração de cada uma das estratégias envolvidas considerando um jogo infinito será:

$$V(ALLD | ALLD) = 0$$

$$V(ALLD | TFT) = \frac{1}{2} \cdot b + \frac{1}{2} \cdot 0 = \frac{b}{2}$$

$$V(TFT | TFT) = \frac{b-c}{1-w}$$

$$V(TFT | ALLD) = \frac{1}{2} \cdot -c + \frac{1}{2} \cdot 0 = -\frac{c}{2}$$

Logo, o menor valor da frequência p de TFT para que possa ocorrer invasão de uma população de TFT numa de ALLD, para um jogo do tipo alternado será:

$$pV(TFT | TFT) + (1-p)V(TFT | ALLD) \geq pV(ALLD | TFT) + (1-p)V(ALLD | ALLD)$$

$$p \cdot \left(\frac{b-c}{1-w} \right) + (1-p) \left(-\frac{c}{2} \right) \geq p \left(\frac{b}{2} \right) + (1-p)(0)$$

$$2p(b-c) + (1-p)(-c)(1-w) \geq p(b)(1-w)$$

$$2bp - 2cp - c + cw + cp - cwp \geq bp - bwp$$

$$2bp - 2cp + cp - cwp - bp + bwp \geq c - cw$$

$$p \geq \frac{c(1-w)}{2b - 2c + c - cw - b + bw}$$

$$p \geq \frac{c(1-w)}{(b-c) + w(b-c)}$$

$$p \geq \frac{c(1-w)}{(b-c)(1+w)}$$

Para $c = 1$; $w = 0,5$ e $b = 4$, a frequência mínima de TFT necessárias para invadir uma população de ALLDs será de 11,11%.

- b) Frequência mínima de ALLC que permita um raro ALLD invadir uma população de TFT e ALLC no caso do jogo alternado

As recompensas da iteração de cada uma das estratégias envolvidas considerando um jogo infinito será:

$$V(ALLD | ALLD) = 0$$

$$V(ALLD | TFT) = \frac{1}{2} \cdot b + \frac{1}{2} \cdot 0 = \frac{b}{2}$$

$$V(ALLD | ALLC) = \frac{b}{1-w}$$

$$V(TFT | TFT) = \frac{b-c}{1-w}$$

$$V(TFT | ALLD) = \frac{1}{2} \cdot -c + \frac{1}{2} \cdot 0 = -\frac{c}{2}$$

$$V(TFT | ALLC) = \frac{b-c}{1-w}$$

$$V(ALLC | TFT) = \frac{b-c}{1-w}$$

$$V(ALLC | ALLD) = -\frac{c}{1-w}$$

$$V(ALLC | ALLC) = \frac{b-c}{1-w}$$

Logo, o menor valor da frequência p de ALLC para que possa ocorrer invasão de uma população de TFT numa de ALLD, para um jogo do tipo alternado será:

$$V(TFT | TFT) < pV(ALLD | ALLC) + (1-p)V(ALLD | TFT)$$

$$\frac{b-c}{1-w} < p \left(\frac{b}{1-w} \right) + (1-p) \left(\frac{b}{2} \right)$$

$$\frac{b-c}{1-w} < \frac{bp}{1-w} + \frac{b-bp}{2}$$

$$2b-2c < 2bp + b - bp - bw + bwp$$

$$b-2c+bw < bp+bwp$$

$$p > \frac{b-2c+bw}{b(1+w)}$$

Para os valores de $c = 1$; $b = 4$ e $w = 0,5$. A frequência de invasão se a frequência da estratégia ALLC for superior a:

$$p > \frac{b - 2c + bw}{b(1+w)}$$

$$p > \frac{4 - 2 + 4 \cdot 0,5}{4 \cdot 1,5}$$

$$p > 66,67\%$$

c) Avaliando equilíbrio entre ALLD e LRS no caso do jogo simultâneo

Vamos avaliar qual é o w necessária para que uma estratégia LRS equilíbrio de Nash possa invadir uma população de ALLD. Para isso vamos tomar como a estratégia LRS representativa, a de forma $S_{0,5;0,5;1}$.

Vamos considerar um jogo do tipo simultâneo com benefícios e custos por rodada de b e c , respectivamente.

As recompensas esperadas da iteração de cada uma das estratégias envolvidas considerando um jogo infinito será:

$$V(ALLD | ALLD) = 0$$

$$V(ALLD | LRS) = b + w \frac{b}{2} + w^2 \frac{b}{2} + w^3 \frac{b}{2} + \dots$$

$$V(ALLD | LRS) = \frac{b}{2} + \frac{b}{2} + w \frac{b}{2} + w^2 \frac{b}{2} + w^3 \frac{b}{2} + \dots$$

$$V(ALLD | LRS) = \frac{b}{2} + \frac{b/2}{1-w}$$

$$V(ALLD | LRS) = \frac{b}{2} \left(\frac{2-w}{1-w} \right)$$

$$V(LRS | LRS) = \frac{b-c}{1-w}$$

$$V(LRS | ALLD) = -\frac{c}{2} - \frac{c/2}{1-w}$$

$$V(LRS | ALLD) = -\frac{c}{2} \left(\frac{2-w}{1-w} \right)$$

Vamos determinar o menor de w para que possa ocorrer invasão de uma população de LRS numa de ALLD, nesta situação será:

$$pV(LRS | LRS) + (1-p)V(LRS | ALLD) \geq pV(ALLD | LRS) + (1-p)V(ALLD | ALLD)$$

$$p\left(\frac{b-c}{1-w}\right) + (1-p)\left(-\frac{c}{2} - \frac{c}{2(1-w)}\right) \geq p\left(\frac{b}{2} + \frac{b}{2(1-w)}\right) + (1-p)0$$

$$2p(b-c) + (1-p)(-c(1-w) - c) \geq p(b(1-w) + b)$$

$$2bp - 2cp + (1-p)(cw - 2c) \geq p(2b - bw)$$

$$2bp - 2cp + cw - 2c - cwp + 2cp \geq 2bp - bwp$$

$$cw - 2c - cwp \geq -bwp$$

$$bwp - cwp \geq 2c - cw$$

$$bwp - cwp + cw \geq 2c$$

$$w \geq \frac{2c}{bp - cp + c}$$

Para os valores de $c = 1$; $b = 4$ e $p = 0,5$. O valor de w que deve ocorrer em:

$$w \geq \frac{2c}{bp - cp + c}$$

$$w \geq \frac{2.1}{4.0,5 - 1.0,5 + 1}$$

$$w \geq 80\%$$

d) Avaliando equilíbrio entre ALLD e LRS no caso do jogo alternado

Vamos avaliar qual é o w necessária para que uma estratégia LRS equilíbrio de Nash possa invadir uma população de ALLD. Para isso vamos tomar como a estratégia LRS representativa, a de forma $S_{0,5;0,5;1}$.

Vamos considerar um jogo do tipo simultâneo com benefícios e custos por rodada de b e c , respectivamente.

As recompensas esperadas da iteração de cada uma das estratégias envolvidas considerando um jogo infinito será:

$$V(ALLD | ALLD) = 0$$

$$V(ALLD | LRS) = \frac{1}{2} \frac{b}{2} + \frac{1}{2} b + w \frac{b}{2} + w^2 \frac{b}{2} + w^3 \frac{b}{2} + \dots$$

$$V(ALLD | LRS) = \frac{b}{4} + \frac{b}{2} + w \frac{b}{2} + w^2 \frac{b}{2} + w^3 \frac{b}{2} + \dots$$

$$V(ALLD | LRS) = \frac{b}{4} + \frac{b/2}{1-w}$$

$$V(ALLD | LRS) = \frac{b}{4} \left(\frac{3-w}{1-w} \right)$$

$$V(LRS | LRS) = \frac{b-c}{1-w}$$

$$V(LRS | ALLD) = -\frac{c}{4} - \frac{c/2}{1-w}$$

$$V(LRS | ALLD) = -\frac{c}{4} \left(\frac{3-w}{1-w} \right)$$

Vamos determinar o menor de w para que possa ocorrer invasão de uma população de LRS numa de ALLD, nesta situação será:

$$pV(LRS | LRS) + (1-p)V(LRS | ALLD) \geq pV(ALLD | LRS) + (1-p)V(ALLD | ALLD)$$

$$p \left(\frac{b-c}{1-w} \right) + (1-p) \left(-\frac{c}{4} \left(\frac{3-w}{1-w} \right) \right) \geq p \left(\frac{b}{4} \left(\frac{3-w}{1-w} \right) \right) + (1-p)0$$

$$4p(b-c) + (1-p)(-c(3-w)) \geq p(b(3-w))$$

$$4bp - 4cp + (1-p)(cw - 3c) \geq p(3b - bw)$$

$$4bp - 4cp + cw - 3c - cwp + 3cp \geq 3bp - bwp$$

$$bp - cp + cw - 3c - cwp \geq -bwp$$

$$bwp - cwp + cw \geq 3c + cp - bp$$

$$w \geq \frac{3c + cp - bp}{bp - cp + c}$$

Para os valores de $c = 1$; $b = 4$ e $p = 0,5$. O valor de w que deve ocorrer em:

$$w \geq \frac{3c + cp - bp}{bp - cp + c}$$

$$w \geq \frac{3.1 + 1.0,5 - 4.0,5}{4.0,5 - 1.0,5 + 1}$$

$$w \geq 0,60$$

23. ANEXOS

Código Fonte do Modelo no NetLogo

```
turtles-own [primeira? fitness k d x0 memol memoaux disponivel? idade ordem
percepcao]
links-own [velho?]

breed [TFTs TFT]
breed [ALLCs ALLC]
breed [ALLDs ALLD]
breed [RTSs RTS]
breed [LRSs LRS]
breed [RTSMs RTSM]

to setup
  clear-all
  reset-ticks

; cria as estratégias

create-tfts numtft [
  setxy random-ycor random-xcor
  set color yellow
  set disponivel? 1
  set primeira? 1
  set fitness fitness_basal
  set x0 1
  set k 1
  set d 0
  set memol 0
  set memoaux 0
  set ordem 0
  set percepcao 0
]
create-allcs numallc [
  setxy random-ycor random-xcor
  set color green
  set disponivel? 1
  set primeira? 1
  set fitness fitness_basal
  set x0 1
  set k 0
  set d 1
  set memol 0
  set memoaux 0
  set ordem 0
  set percepcao 0
]
create-allds numalld [
  setxy random-ycor random-xcor
  set color red
  set disponivel? 1
  set primeira? 1
  set fitness fitness_basal
  set x0 0
  set k 0
  set d 0
  set memol 0
  set memoaux 0
  set ordem 0
]
```

```

    set percepcao 0
]

create-rtss numrts [
setxy random-xcor random-ycor
set color brown
set disponivel? 1
set primeira? 1
set fitness fitness_basal
set x0 0.1
set k 1
set d 0.1
set memol 0
set memoaux 0
set ordem 0
set percepcao 0
]

create-lrss numlrs [
setxy random-xcor random-ycor
set color blue
set disponivel? 1
set primeira? 1
set fitness fitness_basal
set x0 1
set k 0.5
set d 0.5
set memol 0
set memoaux 0
set ordem 0
set percepcao 0
]

create-rtssms numrtsm [
setxy random-xcor random-ycor
set color pink
set disponivel? 1
set primeira? 1
set fitness fitness_basal
set x0 0.5
set k 1
set d 0
set memol 0
set memoaux 0
set ordem 0
set percepcao 0
]
end

to go
let rodada 1
let geracao 1
while [geracao <= Numger]
[
while [rodada <= Numrodada]
[
output-print (word rodada " rodada" " da " "Geração " geracao )
escolher_parceiro
ifelse Tipo_de_Jogo = "Simultaneo" [
calcular_payoff_Simultaneo
atualizar_memoria_Simultaneo
atualizar_memoria_1_Simultaneo ]
[
atribuir_ordem
atualizar_memoria_Alternado
atualizar_memoria_1_Alternado

```

```

    atualizar_memoria_3_Alternado
    calcular_payoff_2_Alternado
    calcular_payoff_1_Alternado
  ]
  atualizar_memoria_2
  continuar_terminar
  ask turtles with [fitness <= 0] [ask turtles-on link-neighbors [set disponivel?
1] die]
  ask turtles [set idade idade + 1]
  set rodada rodada + 1
  ;; inclui este procedure por conta do ruído
  reset_x0
  ]
  selecao

  set-current-plot "Evolução das Estratégias"
  set-current-plot-pen "TFT"
  plot count TFTs
  set-current-plot-pen "ALLC"
  plot count ALLCs
  set-current-plot-pen "ALLD"
  plot count ALLDs
  set-current-plot-pen "RTS"
  plot count RTSs
  set-current-plot-pen "LRS"
  plot count LRSs
  set-current-plot-pen "RTSM"
  plot count RTSMs

  set geracao geracao + 1
  set rodada 1
  ]

end

to escolher_parceiro
  while [ count turtles with [disponivel? = 1] >= 2]
  [
    ask n-of 1 turtles with [disponivel? = 1][create-link-with one-of other turtles
with [ disponivel? = 1] ask links [ ask both-ends [set disponivel? 0]]]
  ]
end

;; Este bloco é para o jogo alternado

to atribuir_ordem
  ask links with [velho? = 0 ] [
    ask end1 [set ordem 1]
    ask end2 [set ordem 2]
    set velho? 1
  ]
end

to atualizar_memoria_Alternado
  ask links
  [
    ask both-ends
    [
      ifelse primeira? = 1
      [
        ifelse p >= random-float 1.000000001
        [
          set percepcao random-float 1.00000000000001

```

```

]
[
set percepcao x0
]

]
[
    ifelse p >= random-float 1.000000001
    [
set percepcao random-float 1.000000000000001
]
[
set percepcao memol
]
]
]
end

to atualizar_memoria_1_Alternado
ask links
[
ask both-ends
[
ifelse primeira? = 1
[
if breed = rtss
[
ifelse x0 > [percepcao] of other-end [set memoaux k * [percepcao] of
other-end]
[
ifelse x0 = [percepcao] of other-end [set memoaux k * x0 + d]
[set memoaux k * x0 + 2 * d]
]
]
]
or (breed = allcs) or (breed = allds) or (breed = tfts) or (breed = lrss)
or (breed = rtsms)
[
set memoaux k * [percepcao] of other-end + d
]
]; set primeira? 0
]
[
if breed = rtss
[
ifelse (memol > [percepcao] of other-end) [set memoaux k * [percepcao] of
other-end]
[
ifelse (memol = [percepcao] of other-end) [set memoaux k * memol + d]
[set memoaux k * memol + 2 * d]
]
]
]
]
or (breed = allcs) or (breed = allds) or (breed = tfts) or (breed = lrss)
or (breed = rtsms)
[
set memoaux k * [percepcao] of other-end + d
]
]
]
end

to calcular_payoff_1_Alternado
ask links
[

```

```

ask one-of both-ends with [ordem = 1]
[
  ifelse primeira? = 1
  [
    set fitness fitness + b * [ memoaux ] of other-end - c * x0
    set primeira? 0
  ]
  [
    set fitness fitness + b * [ memoaux ] of other-end - c * memol
  ]
]
]
end

to calcular_payoff_2_Alternado
ask links
[
  ask one-of both-ends with [ordem = 2]
  [
    ifelse primeira? = 1
    [
      set fitness fitness + b * [ x0 ] of other-end - c * memoaux
      set primeira? 0
    ]
    [
      set fitness fitness + b * [ memol ] of other-end - c * memoaux
    ]
  ]
]
]
end

to atualizar_memoria_3_Alternado
ask turtles [ ifelse memoaux > 1 [set memoaux 1] [ ifelse memoaux < 0 [set
memoaux 0] [set memoaux memoaux] ] ]
end

;; Este bloco é para o jogo simultâneo

to calcular_payoff_Simultaneo
ask links
[
  ask both-ends
  [
    ifelse primeira? = 1
    [
      set fitness fitness + b * [ x0 ] of other-end - c * x0
    ]
    [
      set fitness fitness + b * [ memol ] of other-end - c * memol
    ]
  ]
]
]
end

;; este procedure coloca o ruído no modelo.
to atualizar_memoria_Simultaneo
ask links
[
  ask both-ends
  [
    ifelse primeira? = 1
    [
      if p >= random-float 1.000000001
      [
        set x0 random-float 1.000000000000001
      ]
    ]
  ]
]
]
end

```



```

    ]
    ]
    [
        if p >= random-float 1.000000001
        [
            set memol random-float 1.000000000000001
        ]
    ]
]
end

to atualizar_memoria_1_Simultaneo
ask links
[
ask both-ends
[
ifelse primeira? = 1
[
if breed = rtss
[
ifelse x0 > [x0] of other-end [set memoaux k * [x0] of other-end]
[
ifelse x0 = [x0] of other-end [set memoaux k * x0 + d]
[set memoaux k * x0 + 2 * d]
]
]
]
if (breed = allcs) or (breed = allds) or (breed = tfts) or (breed = lrss)
or (breed = rtsms)
[
set memoaux k * [x0] of other-end + d
]
set primeira? 0
]
[
if breed = rtss
[
ifelse (memol > [memol] of other-end) [set memoaux k * [memol] of other-
end]
[
ifelse (memol = [memol] of other-end) [set memoaux k * memol + d]
[set memoaux k * memol + 2 * d]
]
]
]
if (breed = allcs) or (breed = allds) or (breed = tfts) or (breed = lrss)
or (breed = rtsms)
[
set memoaux k * [memol] of other-end + d
]
]
]
]
end

to atualizar_memoria_2
ask turtles [ ifelse memoaux > 1 [set memol 1] [ ifelse memoaux < 0 [set memol 0]
[set memol memoaux] ] ]
end

to selecao
;; usando n-of 1 no lugar de one-of os resultados não mudaram!!!
;ask one-of ( turtles with-min [fitness] ) [die]
;ask one-of ( turtles with-max [fitness]) [ hatch 1 [setxy random-xcor random-
ycor]]
ask links [die]
;; ask min-one-of turtles [fitness] [die]

```

```

ask min-n-of 1 turtles [fitness] [die]
ask max-one-of turtles [fitness] [ hatch 1 [setxy random-xcor random-ycor]]

ask turtles [set idade 0 set disponivel? 1 set primeira? 1 setxy random-xcor
random-ycor set fitness fitness_basal]
;; inclui este procedure por conta do ruído
reset_x0
end

;; da forma que inclui o ruido, preciso resetar x0 sempre
to reset_x0
ask allcs [set x0 1]
ask tfts [set x0 1]
ask lrss [set x0 1]
ask rtss [set x0 0.1]
ask allds [set x0 0]
ask rtsms [set x0 0.5]
end

to continuar_terminar
ask links [ if w < random-float 1.000000000001 [ ask both-ends [
set disponivel? 1
set primeira? 1]
die ]]
end

```