



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.01.11.00-TDI

## UMA EXTENSÃO DO TERRA ME PARA MODELAGEM DE DINÂMICA DE SISTEMAS ESPACIAIS

André Chiarelli

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelo Dr. Gilberto Câmara, aprovada em 10 de fevereiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3G3G5HL>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.01.11.00-TDI

## UMA EXTENSÃO DO TERRA ME PARA MODELAGEM DE DINÂMICA DE SISTEMAS ESPACIAIS

André Chiarelli

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelo Dr. Gilberto Câmara, aprovada em 10 de fevereiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3G3G5HL>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Chiarelli, André.

C43u Uma extensão do Terra ME para modelagem de Dinâmica de Sistemas Espaciais / André Chiarelli. – São José dos Campos : INPE, 2014.

xx + 125 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.01.11.00-TDI)

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientador : Dr. Gilberto Câmara.

1. dinâmica de sistemas espaciais. 2. modelagem de sistemas espaciais. 3. modelagem de sistemas. I.Título.

CDU 528.85

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Computação Aplicada**

Dr. Fernando Manuel Ramos

Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Gilberto Câmara

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Lúbia Vinhas

Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Pedro Ribeiro de Andrade Neto

Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Clodoveu Augusto Davis Junior

Convidado(a) / UFMG / Belo Horizonte - MG

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

( ) unanimidade

Aluno (a): **André Chiarelli**

São José dos Campos, 10 de Fevereiro de 2014



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e ao Programa de Pós Graduação de Computação Aplicada, pela oportunidade.

Ao meu orientador, Gilberto Câmara, pela orientação durante o desenvolvimento deste trabalho, amizade e incentivos que me deram suporte para vencer desafios e concluir este trabalho.

Aos membros da banca, pelas contribuições para este trabalho.

À Taciana Lemos Dias, por quem sou muito grato pelas revisões, contribuições, apoio e acompanhamento durante este trabalho.

À Lúbia Vinhas, por me sempre me guiar para o foco do trabalho.

Ao serviço de Informação e Documentação (SID) do INPE, pela contribuição durante o fechamento do trabalho.

Aos meus amigos Ligia Correia, Sabrina Sambatti, Daniel Paraiso, Victor Wegner Maus por me escutar, discutir e colaborar em todos os momentos.

A meus pais, Hilário Chiarelli Filho e Antônia Batista Chiarelli, por quem sou sempre grato pelos incentivos a seguir o melhor caminho.



*“Can we move nations and people in the directions of sustainability? Such a move would be a modification of society comparable in scale to only two other changes: the Agricultural Revolution of the late Neolithic and the Industrial Revolution on the past two centuries. Those revolutions were gradual, spontaneous, and largely unconscious. This one will have to be a fully conscious operation, guided by the best foresight that science can provide.... If we actually do it, the undertaking will be absolutely unique in humanity’s stay on Earth”.*

*- William D. Ruckelshaus, 1989*



## RESUMO

Dada à importância das mudanças ambientais globais, a comunidade científica desenvolve modelos espaço temporais que indicam cenários para análise de impactos. O desenvolvimento de tais modelos é um desafio que exige estudos das regras que regem o sistema sendo modelado para prover resultados mais próximos da realidade. Simulações geradas com tais modelos possibilitam comparações de cenários que oferecem suporte a estudos e auxiliam a tomada de decisão sobre mudanças de regras que regem o sistema modelado. A Dinâmica de Sistemas é uma abordagem de modelagem computacional que possibilita análise de problemas complexos em diversas áreas e para utilizar esta abordagem com modelos ambientais, é necessário levar em consideração os dados espaciais para a análise de cenários de diferentes modelos de sistemas que sofrem a interferência humana no ambiente. Este trabalho disponibiliza uma extensão do ambiente de modelagem espacial TerraME, baseada em conceitos de Dinâmica de Sistemas para oferecer suporte ao desenvolvimento de modelos espaço temporais padronizados e reutilizáveis. Para avaliação do trabalho, foram implantados o modelo simplificado de desvio de água do lago Mono Lake, localizado na Califórnia, Estados Unidos e o modelo simplificado de produção de milho em Minas Gerais, Brasil. A extensão proposta mostrou que utilizar recursos de Dinâmica de Sistemas no TerraME provê padronização e potencializa reutilização de partes do modelo. O trabalho potencializa a visualização do cenário e é uma motivação para os avanços na construção de modelos reutilizáveis.



## **AN EXTENSION FOR THE TERRAME FOR SPATIAL SYSTEM DYNAMICS**

### **ABSTRACT**

Due the importance of global environmental change, the scientific community develops spatial and temporal models that indicate scenarios for impact analysis. The development of such models is a challenge that requires study of the rules governing the system being modeled to provide results closer to reality. Simulations with such models allow comparisons of scenarios that support studies and assist decision making about changes in rules governing the modeled system. System Dynamics is an approach to computational modeling that enables analysis of complex problems in various areas and to use this approach to environmental models , it is necessary to take into account the spatial data for scenario analysis of different models of systems suffering human interference on the environment. This work provides an extension of the environment to spatial modeling, TerraME based on concepts of System Dynamics to support the development of standardized and reusable spatial models. To validate the extension provided by this work, the simplified model of water diversion from Mono Lake, located in California, United States and a simplified model of corn production in Minas Gerais, Brazil were implemented with the extension. The proposed extension showed that using of System Dynamics resources in TerraME provides standardization and maximizes reuse of parts of the model. The work enhances the display of the scenarios and is a motivation for progress in building reusable model components.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Diagrama de Enlace do setor Capital do modelo WORLD3 de Meadows et al. (2004).....	14
Figura 2.2 – Arquitetura do TerraME .....	20
Figura 3.1 - Estoques espacializados de Dinâmica de Sistemas Espaciais.....	25
Figura 3.2 – Relação de Estoques-Células para diferentes produções agrícolas .....	26
Figura 3.5 - Arquitetura da extensão do TerraMe para modelagem espacial de Dinâmica de Sistemas.....	29
Figura 3.6 – Diagrama de Estoque e fluxo da função <i>controlledLevelGrowth(percentage)</i> .....	34
Figura 3.7 – Diagrama de Estoque e fluxo da função <i>controlledLevelGrowth(percentage, level)</i> .....	34
Figura 3.8 – Diagrama de Estoque e fluxo da função <i>controlledLevelDecay(percentage, level)</i> .....	35
Figura 3.9 – Diagrama de Estoque e fluxo da função <i>delay1(input, delayDuration, initial)</i> .....	35
Figura 3.10 – Diagrama de Estoque e fluxo da função <i>delay3(input, delayDuration, initial)</i> .....	35
Figura 3.11 – Diagrama de Estoque e fluxo da função <i>trendExtrapolation (input, time, horizon, initial)</i> .....	36
Figura 3.12 – Diagrama de Estoque e fluxo da função <i>smth1(input, time, initial)</i> .....	37
Figura 3.13 – Diagrama de Estoque e fluxo da função <i>smth3(input, time, initial)</i> .....	37
Figura 3.14 – Diagrama de Estoque e fluxo do modelo de troca de água da banheira .	38
Figura 3.15 – Cenário do modelo de troca de água da banheira com fluxo de entrada após 20 min .....	41
Figura 3.16 – Cenário do modelo de troca de água da banheira sem fluxo de entrada após 20 min .....	43

Figura 3.17 – Cenário do modelo de troca de água da banheira sem fluxo de entrada após 20 min .....	44
Figura 3.18 – Diagrama de Estoque e fluxo do modelo de controle de temperatura residencial através de termostato .....	45
Figura 3.19 – Cenário do modelo sem utilização de suavidade .....	49
Figura 3.20 – Cenário do modelo com utilização de suavidade de primeira ordem com intensidade 1.....	50
Figura 3.21 – Cenário do modelo com utilização de suavidade de primeira ordem com intensidade 5.....	51
Figura 3.22 – Cenário do modelo com utilização de atraso de primeira ordem com 3 horas de atraso.....	52
Figura 4.1 – Mono Lake .....	54
Figura 4.2 – Histórico de elevação do <i>Mono Lake</i> .....	55
Figura 4.3 – Fluxos de água do <i>Mono Lake</i> .....	57
Figura 4.4 – Diagrama de Estoque e Fluxos do modelo de fluxo de água do <i>Mono Lake</i> .....	58
Figura 4.5 – Cenário com curvas de níveis para o volume de água no Mono Lake, gerado para os anos (a) 2000. (b) 2010, (c) 2020, (d) 2030, (e) 2040 e (f) 2050.....	62
Figura 4.6 – Modelos de culturas .....	65
Figura 4.7 - Mapa de produtividade de milho representado por faixas em Kg/ha.....	73
Figura 4.8 - Diagrama de estoque e fluxo do modelo simplificado de cultivo do milho	75
Figura 4.9 – Cenário com (a) 10 dias, (b) 15 dias, (c) 20 dias, (d) 30dias, (e) 35 dias e (f) 40 DAE utilizando diferentes quantidades de fertilizantes.....	78

## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Tabela 2.1 - Simbologia utilizada nos diagramas de enlace casual.....	15
Tabela 2. 2 - Simbologia utilizada nos diagramas de estoques e fluxos .....	16
Tabela 4.1 - Área da superfície do lago Mono Lake em função do volume de água .....	59
Tabela 4.2 - Extração média de nutrientes pela cultura do milho destinada à produção de grãos e silagem.....	68
Tabela 4.3 - Interpretação das classes de disponibilidade de fósforo no solo, de acordo com o teor de argila e disponibilidades de potássio.....	70
Tabela 4.4 - Recomendação de adubação para milho grãos com base na análise de solo e na produtividade esperada.....	70
Tabela 4.5 - Principais estados produtores de milho no Brasil em 2008. ....	73



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**Pág.**

DS	Dinâmica de Sistemas
EMPRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
MCG	Mudanças Climáticas Globais
SID	Serviço de Informação e Documentação
SPG	Serviço de Pós-Graduação
TDI	Teses e Dissertações Internas
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Estrutura do documento .....	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Teoria Geral de Sistemas .....	7
2.1.1 Sistemas.....	9
2.2 Dinâmica de sistemas.....	12
2.2.1 Diagramas de Estoques e Fluxos .....	15
2.2.2 Aplicações de dinâmica de sistemas .....	17
2.3 Ambientes computacionais para modelagem de sistemas espaciais. ....	18
2.4 Dinâmica de sistemas espaciais.....	20
<b>3 EXTENSÃO DO TERRAME PARA MODELAGEM ESPACIAL DE DINÂMICA DE SISTEMAS.....</b>	<b>23</b>
3.1 Extensão do TerraME para modelagem espacial com Dinâmica de Sistemas.....	23
3.2 Arquitetura da extensão para o TerraME para modelagem de Dinâmica de Sistemas Espaciais .....	28
3.3 Implementação da extensão de Dinâmica de Sistemas Espaciais para o ambiente de Modelagem TerraME .....	29
3.3.1 Implementação do Estoque Espacializado .....	29
3.3.2 Implementação da estrutura Mundo.....	31
3.4 Funções de Dinâmica de Sistemas implementadas para reutilização em modelagem espacial.....	33
3.5 Modelos simplificados implementados com a extensão proposta para o ambiente de modelagem TerraME.....	37
<b>4 MODELOS PARA VALIDAÇÃO DA EXTENSÃO PROPOSTA PARA MODELAGEM ESPACIAL DE DINÂMICA DE SISTEMAS NO TERRAME .....</b>	<b>53</b>
4.1 Modelo simplificado de fluxo de água no <i>Mono Basin</i> .....	53

4.2	Sistemas dinâmicos de produções agrícolas no Brasil .....	63
4.3	Modelos de produções agrícolas brasileiras .....	66
4.4	Dados de produções agrícolas brasileiras .....	66
4.5	Dados de produções de milho brasileiras .....	67
4.6	Relação entre fertilizantes com nitrogênio nas produções de milho brasileiras.....	68
4.7	Relação entre fertilizantes com fósforo nas produções de milho brasileiras .....	69
4.8	Cálculos de balanço hídrico .....	71
4.9	Equações de produção para o cultivo de milho .....	71
4.10	Localização geográfica dos cultivos de milho no Brasil.....	72
4.11	Implementação do modelo de produção de milho para o estado de Minas Gerais, Brasil. ....	74
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>91</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>111</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O conceito de sustentabilidade engloba diferentes sentidos, com um nexo comum. Sustentabilidade pode ser entendida como a busca do equilíbrio entre as necessidades da humanidade e a capacidade de suporte da Terra de atendê-las, sem comprometer os sistemas naturais de forma irreversível, garantindo que os recursos existentes estejam disponíveis no futuro ou mesmo que não comprometam a vida no planeta. Há muitas indicações que os caminhos de consumo dos bens da natureza adotados pela humanidade a partir do século XIX levaram a um mundo insustentável. Um recente estudo científico apresentado por Rockstrom et al. (2009a) apresenta nove limites planetários que já ultrapassamos ou corremos o risco de ultrapassar nas próximas décadas. Esses limites são: mudanças climáticas, acidificação dos oceanos, disponibilidade de água doce, mudanças de uso da terra, degradação da camada de ozônio, descontrole nos ciclos de nitrogênio e fósforo, perda de biodiversidade, aumento excessivo dos aerossóis na atmosfera, e poluição química. Em cada caso, ultrapassar os limites significa colocar em risco a sustentabilidade da Terra.

Dada a importância das mudanças ambientais globais, a comunidade científica desenvolve modelos que indicam possíveis cenários futuros. A mudança climática é uma área muito estudada, tanto por seus efeitos globais quanto pelo desenvolvimento de modelos com maior capacidade de descrever a Física e a Dinâmica do clima. O uso da terra é estudado principalmente com desenvolvimento de modelos tais como os de desenvolvimento de culturas, de mudança de uso e cobertura do solo, e outros modelos para estudos dos efeitos de sistemas ambientais humanos (queimadas, desmatamento, emissão de gases de efeito estufa, arranjos institucionais, dentre outros.) nos sistemas terrestres (atmosfera, oceanos, superfície vegetada, etc.).

Existem diferentes formas de modelar o ambiente. Dentre os tipos de modelos estão os: (i) modelos mentais, que são os mais utilizados, baseados em generalizações pressupostas ou imagens que influenciam para o entendimento do mundo; (ii) os modelos matemáticos, que são simplificações

de sistemas do mundo real através de representações por equações e (iii) modelos computacionais, que utilizam modelos matemáticos e técnicas da computação para análise de fenômenos e problemas complexos, como a poluição do ar em centros urbanos, o acúmulo de gases de efeito estufa e efeitos da mudança climática.

Entre as abordagens de modelagem computacional, destaca-se a Dinâmica de Sistemas, desenvolvida na década de 1960 por Jay Forrester com o intuito de analisar e resolver problemas complexos (FORRESTER, 1961). O foco da abordagem está na análise de regras de um sistema e no processo de conversão de informação em ação. Essa abordagem, inicialmente chamada de '*Industrial Dynamics*', considera as inter-relações entre os diversos elementos de um sistema e utiliza a simulação computacional para analisar as estruturas e seus comportamentos ao longo do tempo.

Atualmente, a Dinâmica de Sistemas é utilizada em diversas linhas de pesquisa. O principal motivo de sua ampla utilização e aceitação reside na aplicação de conceitos como:

- (i) Realimentação de informações - Processo em que as informações sobre o passado ou o presente de partes do sistema que influenciam no estado da parte que recebe estas informações, formando-se uma cadeia de causa e efeito de forma cíclica.
- (ii) Atrasos em respostas – Diferencial de tempo entre o disparo de uma informação e sua reação no sistema.
- (iii) Crescimento ou decaimento controlado – A quantidade de energia ou matéria acumulada em uma determinada parte do sistema dependente do estado atual da própria parte.

Existem vários ambientes de modelagem e simulação que utilizam a abordagem de Dinâmica de Sistemas como Stella (ROBERTS et al., 1983), Dynamo (SIMON, 1998), Vensim (EBERLEIN; PETERSON, 1992), Smile (MUETZELFELDT; MASSHEDER, 2003) e Modelica (ELMQVIST, 1998). Estes

ambientes nos oferecem suporte para representar as estruturas de tomada de decisão dos sistemas e observar as mudanças contínuas que ocorrem durante um intervalo de tempo, através de fluxos de informações.

Em sua maioria, os modelos desenvolvidos com a abordagem de Dinâmica de Sistemas não representam o espaço geográfico de forma explícita pois a abordagem foca em dados quantitativos abstraindo dados quanto a localização. No Brasil, há muito interesse em modelar o uso da terra, como ilustram os modelos de cultivo de trigo por Siqueira *et al.* (2001), milho e soja por Pinto *et al.* (2002), café por Assad *et al.* (2004) e de milho, feijão, arroz, soja e café por Nobre *et al.* (2005). Estes modelos se beneficiariam em representar explicitamente o espaço geográfico.

Para representar o espaço, é preciso levar em conta a variabilidade dos solos, clima, culturas, e insumos. Levar esta variação em consideração é importante, por exemplo, para modelos na área de estudos de uso da terra.

Dada esta motivação, este trabalho propõe uma extensão da metodologia de Dinâmica de Sistemas para o ambiente computacional TerraME com a finalidade utilizar o suporte à representação do espaço geográfico que o TerraME, que seja capaz de prover suporte tanto à tomada de decisão quanto ao monitoramento de sistemas espaciais.

As questões estudadas nesta pesquisa são:

- (a) Quais são as estruturas necessárias para integração de técnicas de Dinâmica de Sistemas no ambiente de modelagem espacial TerraME?
- (b) Como expressar problemas de Dinâmica de Sistemas no ambiente de modelagem espacial TerraME de forma padronizada para reutilização?

Em resposta a estas questões, os objetivos específicos desta pesquisa são:

1. Identificar as funções e estruturas-base de Dinâmica de Sistemas.

2. Implementar estruturas e funções identificadas no item (1) no ambiente de modelagem espacial TerraME.
3. Construir uma extensão para o ambiente de modelagem espacial TerraME, com os tipos e funções de dados mapeados no item (2), que permita a modelagem com padrões de Dinâmica de Sistemas.
4. Validar a implementação proposta nesse trabalho reproduzindo modelos de sistemas ambientais disponíveis na literatura.

A fim de validar o a implementação da extensão proposta para o ambiente de modelagem TerraME, implementamos com a extensão o modelo simplificado proposto por Andrews Ford (1999) de desvio de água do Mono Lake, localizado na Califórnia, para a cidade de Los Angeles e um modelo de produção de cultivo de milho aplicado para o estado de Minas Gerais, Brasil, com equações disponibilizadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, adaptado para levar em consideração a aplicação de fertilizantes com nitrogênio e fósforo no cultivo.

Os resultados finais desta dissertação estão apresentados na forma de funções e estruturas de dados.

## **1.1 Estrutura do documento**

Este documento é estruturado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 revê a literatura sobre os conteúdos e desafios de modelagem espacial com foco em ferramentas e ambientes computacionais para desenvolvimento de modelos de sistemas.
- O Capítulo 3 detalha a metodologia utilizada para implementação e disponibilização da extensão de Dinâmica de Sistemas para o TerraME. São discutidos os componentes de Dinâmica de Sistemas integrados em ambiente de modelagem espacial.

- No Capítulo 4 são apresentados os modelos implementados com a extensão proposta para demonstração de como utiliza-la e validar a implementação de estruturas de Dinâmica de Sistemas desta pesquisa.
- No Capítulo 5 é feito o fechamento do trabalho, com as considerações finais e conclusões desta dissertação.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo, serão apresentadas análises de conteúdos e desafios que foram levados em consideração para o desenvolvimento da extensão para modelagem espacial de Dinâmica de Sistemas no TerraME.

### 2.1 Teoria Geral de Sistemas

O conceito de sistemas é amplo e envolve vários estudos de diferentes áreas. A teoria de sistemas tomou corpo a partir do início do século 20, com estudos sobre o tema com base em definições de biologia (Ludwig von Bertalanffy), psicologia (Walter B. Cannon, Walter Pitts, Warren McCulloch), cibernética e teoria da informação (Claude E. Shannon, Norbert Wiener, William Ross Ashby). A abordagem de teoria de sistemas tem causado profundo impacto nos estudos de diversas áreas (KRIPPNER A, 1998). Esta seção apresenta a importância da Teoria Geral de Sistemas para a comunidade científica, traça a história da abordagem de teoria de sistemas e apresenta os estudos presentes na literatura que se destacam.

No século passado, Ludwig von Bertalanffy (1901-1972), um biólogo austríaco, iniciou estudos sobre regras de organizações. Durante a década de 1930, Bertalanffy trabalhou sobre o conceito de sistemas. Este trabalho foi aperfeiçoado na década de 1940 e em 1950 ele publicou os primeiros artigos que formam a base sustentadora de Teoria Geral de Sistemas. Em 1968, ele publicou sua obra clássica, introduzida por Bertalanffy como "*Allgemeine Systemlehre*", traduzida para o inglês como "*General System Theory*" e finalmente para o português como Teoria Geral de Sistemas – TGS. Os estudos permitiram sua aplicação por diferentes domínios como medicina, psicologia, biologia, entre outras (HOFKIRCHNER, 2004).

O foco da TGS não é buscar soluções para problemas, mas sim produzir teorias e formulações conceituais. A TGS se tornou significativa devido à necessidade de entender e avaliar sistemas como um todo e não somente as partes (HOFKIRCHNER, 2004). Cada parte tem um objetivo e é um sub-

sistema autônomo que contribui para o objetivo comum do sistema global representado. Outro fator que também é significativo para o destaque da TGS é a aplicação do conceito de realimentação de informação (*feedback*).

O propósito principal da TGS é a integração das várias áreas da ciência, com uma abordagem abrangente para estudar o conhecimento científico e desenvolver princípios unificadores que cruzem os universos particulares das diversas áreas das ciências envolvidas. A motivação para tal integração é resolver problemas baseado na interação dinâmica das partes que modelam o comportamento de um sistema, uma vez que estudar os constituintes e os processos de maneira separada não é suficiente (BERTRAND; GUILLEMET, 1989).

O foco da TGS está na interdependência das partes dos sistemas, considerações acerca do ambiente, equilíbrio e adaptação devido à demanda do ambiente e auto-organização para respostas a intervenções externas. Estes conceitos formam o fator chave para entendimento de sistemas (STICHWEH, 2011).

Os métodos propostos pela teoria de sistemas são usados para modelar entidades complexas criadas através de múltiplas interações de componentes, abstraindo certos detalhes de estrutura e componentes, concentrando na dinâmica que define funções características, propriedades e relacionamentos que são internos e externos em relação ao sistema (KRIPPNER, 1998).

A vantagem de tais métodos é o potencial para desenvolvimento de arcabouços interdisciplinares que oferecem suporte para críticas simultâneas e exploração normativa do sistema.

Dentre as abordagens trabalhadas pela teoria de sistemas, se destacam na literatura: (i) a abordagem de sistema evolucionário, introduzida como um dos mais recentes avanços nos estudos de sistemas que envolvem otimização combinatória para resolução de problemas (CHIONG R et al., 2012); (MICHALEWICZ, 1996); (RECHENBERG; INGO, 1973), (ii) a abordagem de

mapas cognitivos, na qual são exploradas as ferramentas conceituais que contribuem para estudos de percepção (KRIPPNER, 1998); (iii) teoria de sistemas puros (PUGH, 1969 apud EMERY, 1976); (FLOOD; KEYS, 1989); (CAPRA, 2002), (iv) sistemas aplicados à organização (MÉLÈSE, 1969); (BERTRAND; GUILLEMET, 1989), (v) sistemas de informação (DOSWELL, 1985) e dicionários linguísticos especializados e populares (FERREIRA, 1999)

### **2.1.1 Sistemas**

Na literatura temos presentes várias definições de sistemas, algumas delas são:

1. Pela ABL (1943): “Reunião de princípios coordenados de modo que constituam um todo científico ou corpo de doutrina. Combinação de partes que formam um todo”.
2. Bertalanffy apud Bertrand e Guillemet (1988): “Sistema é a unidade resultante de partes em mútua interação”.

Entre as várias definições de sistemas, nesta pesquisa, a que mais nos chamou a atenção descreve sistemas como “um conjunto de objetos interconectados de forma organizada e coerente, de modo a representar fenômenos que são disparados ou influenciados por forças externas com respostas características”. (MEADOWS, 1972); (FERREIRA, 1999); (KRIPPNER, 1998). Esta definição vem dos conhecimentos derivados da Teoria Geral de Sistemas e sua aplicação no domínio de sistemas de atividades humanas (KRIPPNER, 1998).

Os sistemas apresentam algumas características que são gerais e essenciais. Segundo Bertrand e Guillemet (1988) estas características são:

1. Abertura: relação entre a estrutura do sistema quanto à troca de energia, matéria ou informação com seu meio. Se um sistema é considerado aberto ele possui essa interação. Se um sistema é não é

aberto, ele é considerado fechado e não possui essa interação com o meio externo.

2. Complexidade: analisada quanto à quantidade de subsistemas contidos no sistema.
3. Finalidade: interação das partes em função de um objetivo ou de um estado final que caracteriza o sistema por inteiro. Essa característica pode ser estendida para equifinalidade, que é uma característica de sistemas abertos. Equifinalidade é a capacidade de partir de diferentes pontos do sistema, utilizando diferentes caminhos e atingir a mesma intenção.
4. Tratamento: unidade de tratamento que realiza processos.
5. Totalidade: o sistema como um todo e não como a soma das partes.
6. Fluxo: troca de matéria e/ou energia entre as partes do sistema.
7. Regulação: ajustes e seleção de operações para alcançar um objetivo estipulado. A determinação de objetivos constitui a base para planificação.
8. Retroação: controle das operações, através da observação de resultados obtidos e comparação com informações provenientes da regulação, para que desvios sejam corrigidos.
9. Equilíbrio: relações harmônicas entre componentes e forças para alcançar a estabilidade dinâmica.
10. Entropia: fases do sistema que são classificadas quanto ao nascimento, evolução, crescimento e morte do sistema.

O conjunto formado pela união das partes ou elementos em uma determinada ordem ou organização e a forma como esses elementos ou partes se relacionam entre si, formam a estrutura dos sistemas (FERREIRA, 1999).

KAST (1988) e Bertrand e Guillemet (1988) definem essa estrutura como um elo ou rede entre o meio organizacional e os subsistemas, e afirmam que a estrutura é o elemento que assegura a integração dos subsistemas. Uma vez estabelecida a estrutura, e enquanto ela vigora, ela delimita as possibilidades do funcionamento dinâmico do sistema. É necessário compreender o conceito de estrutura do sistema como o modelo estabelecido das relações entre os elementos de uma organização. A estrutura como modelo encontra a origem em um processo de concepção e que pode evoluir (BERTRAND; GUILLEMET, 1988).

Devido à complexidade dos sistemas, para melhor compreensão e assimilação pelo ser humano, é necessário uma simplificação. Para isso, adotamos modelos que, através da estrutura do sistema, representam uma realidade simplificada a ser analisada (BERTRAND; GUILLEMET, 1988; MEADOWS, 1974; MEADOWS, 2004; FORRESTER, 1985). A modelagem de sistemas visa conceituar, integrar e generalizar o conhecimento científico através da simplificação da realidade pela estrutura essencial do sistema, o que resulta em ferramenta de auxílio para simulações de diversos cenários específicos para o sistema a ser investigado. Os cenários são concebidos a partir de diversos atributos provenientes de entidades das diferentes áreas de conhecimento.

Uma entidade pode ser definida como um objeto abstrato ou concreto, pertencente ao mundo real, do qual se deseja guardar informações, como, por exemplo, produtos de culturas, capital, e outros. Um atributo é tudo o que se pode relacionar como propriedade da entidade, como o nome do produto e o nome dos fatores químicos. O conjunto de valores possíveis para os atributos de um elemento é denominado *domínio*. Os cenários devem ser concebidos para possibilitar a compreensão de como os atributos de um modelo relacionam entre si, dentro de limites pré-definidos pelo modelador (DOURADO. et al., 1998; THORNLEY, 1998; MUNIZ et al., 2007).

Todos os modelos possuem um grau de abstração que permite um julgamento a ser feito no contexto dos objetivos. A chave para uma efetiva

modelagem está no equilíbrio entre o realismo e a abstração na reprodução do sistema. Os modelos contêm diversos graus de aplicação para diferentes circunstâncias. (THORNLEY; JOHNSON, 1990; (DOURADO NETO et al., 1998; THORNLEY, 1998).

## **2.2 Dinâmica de sistemas**

Entre as abordagens existentes para modelar sistemas, se destaca a Dinâmica de Sistemas, introduzida por Jay Forrester. A abordagem é hoje muito aceita e utilizada por diversas áreas da ciência para resolução de problemas complexos presentes em sistemas. Ela aborda as definições de estrutura de sistemas e de características de sistemas como realimentação de informação, respostas com atrasos, estoques e fluxos de matéria e/ou energia que serão melhor apresentadas na seção seguinte.

Durante a II Guerra Mundial, Jay Forrester, trabalhou no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) para as forças armadas americanas, desenvolvendo controles automáticos para armamentos militares. Na década de 1960, Jay Forrester desenvolveu a Dinâmica de Sistemas (do termo em Inglês: *System Dynamics*), baseada na Teoria Geral de Sistemas (BERTALANFFY, 1977). A abordagem, inicialmente chamada de '*Industrial Dynamics*' (FORRESTER, 1961), considera as inter-relações entre os diversos elementos de um sistema e utiliza a simulação computacional para analisar a estrutura de um sistema e seu comportamento ao longo do tempo.

Atualmente ela é utilizada por diversas áreas de pesquisas como medicina, engenharia, administração, biologia e economia, devido ao suporte a compreensão dos processos dinâmicos que impulsionam uma determinada evolução no tempo. A abordagem computacional evoluiu muito desde quando foi proposta, principalmente como ferramenta de modelagem de sistemas com realimentação de informação para estruturas complexas (SYSTEM DYNAMIC SOCIETY, 2009).

Historicamente, a DS integra a engenharia de controle e os conceitos de realimentação e autorregulação, com a cibernética e sistemas de controle e com a teoria de decisão em organizações humanas (MEADOWS, 2004 apud FERNANDES, 2001). A abordagem possui uma visão de todo um sistema ao invés de simplesmente levar em consideração reações em cadeia (HARTT, 2011). Para isso são utilizadas realimentações de informações que dependem de dados históricos do sistema (SIMONOVIC; AHMAD, 2005, p. 29).

Os modelos de DS, desde os mais simples aos mais complexos, podem levar a soluções além das barreiras cognitivas (HARTT, 2011). A base para estas resoluções é a realimentação de informações que ocorrem devido às mudanças de estados em um sistema na escala temporal (HARTT, 2011; STERMAN, 2000). Diferentemente de sistemas lineares, sistemas dinâmicos envolvem realimentação com reações de cadeia que afetam muito mais do que partes óbvias de um sistema. As realimentações podem ser representadas por vários subsistemas (HARTT, 2011; STERMAN, 2000). Tais representações utilizam *diagramas de enlace (causal-loop diagrams)* que possibilitam melhor visualização e compreensão do comportamento do sistema.

Os diagramas de enlace disponibilizam melhor visualização da estrutura do sistema devido à identificação das características, das relações causa-efeito e das estruturas de realimentação (MEDEIROS, 2006). Isto possibilita representar, ordenadamente, as variáveis do modelo, a interação entre as variáveis e as relações causa e efeito de forma simplificada (ANDRADE, 1997), permitindo identificar como a interação entre os elementos influencia no sistema como um todo (MEDEIROS, 2004). Os diagramas de enlace empregam funcionalidade de esboço de hipóteses casuais e possibilitam visualização da comunicação das pressupostas estruturas do sistema (STERMAN, 2000). A Figura 2.1 exemplifica uma aplicação de diagrama de enlaces.

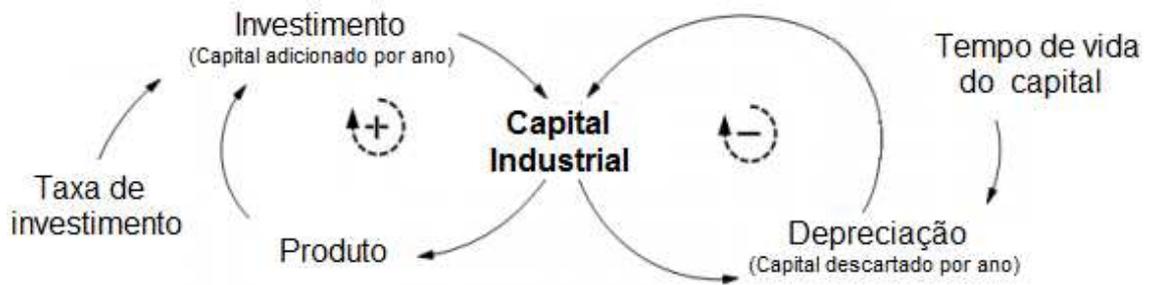


Figura 2.1 – Diagrama de Enlace do setor Capital do modelo WORLD3 de Meadows et al. (2004)

Fonte: Adaptado de Meadows et al. (2004)

O diagrama de enlace evidencia os efeitos da realimentação no sentido de reforço positivo ou negativo. No diagrama de enlace do setor Capital Industrial da Figura 2.1, quanto maior for a taxa de investimento, maior será o produto e quanto maior for o tempo de vida do capital, menor será a depreciação. O efeito de realimentação também pode anular o efeito de decisão com a finalidade de chegar a um ponto de equilíbrio (FORRESTER, 1961).

Os modelos de DS levam em conta o tempo de resposta resultante de uma decisão no sistema, o qual nem sempre vem de imediato. Isto caracteriza os atrasos de resposta do sistema, os quais, se não forem levados em consideração, frequentemente causam oscilações ou mesmo a falência total do sistema. O diagrama de enlace casual utiliza as simbologias da Tabela 2.1 para demonstrar visualmente os efeitos de realimentação.

Tabela 2.1 - Simbologia utilizada nos diagramas de enlace

Simbologia	Descrição
Variável A $\xrightarrow{+}$ Variável B	A variável A influencia a variável B positivamente. Se A cresce, logo, B cresce.
Variável A $\xrightarrow{+}$ Variável B	A variável A influencia a variável B positivamente com algum atraso. Se A cresce, logo, após algum tempo, B cresce.
Variável A $\xrightarrow{-}$ Variável B	A variável A influencia a variável B negativamente. Se A cresce, logo, B diminui.
Variável A $\xrightarrow{-}$ Variável B	A variável A influencia a variável B negativamente com algum atraso. Se A cresce, logo, após algum tempo, B diminui.
	Enlace de realimentação de reforço negativo. A troca de informações entre as partes envolvidas no enlace resulta em decaimento quantitativo das partes envolvidas a cada interação da realimentação de informação entre as partes.
	Enlace de realimentação de reforço positivo. A troca de informações entre as partes envolvidas no enlace resulta em crescimento quantitativo das partes envolvidas a cada interação da realimentação de informação entre as partes.

É importante ressaltar que o diagrama de enlace é instrumento eficaz para simplificar a visualização da estrutura do sistema, nos possibilitando uma representação qualitativa, porém para representação quantitativa das mesmas relações a DS utiliza Diagramas de Estoques e Fluxos, que possibilitam representações através de fórmulas lógico-matemáticas.

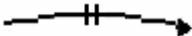
### 2.2.1 Diagramas de Estoques e Fluxos

Diagramas de Estoques e Fluxos são utilizados como representações mais elaboradas da dinâmica de funcionamento operacional do sistema. Através dos diagramas é possível visualizar o comportamento estrutural do sistema por meio de modelos de simulação computacional (ANDRADE, 1997).

O diagrama contempla quatro elementos básicos: (i) estoque, considerado variável de estado que pode variar em escala temporal; (ii) fluxo, considerado variável de ação que interage com estoques, resultando em possíveis variações dos estoques com os quais interage; (iii) auxiliares ou

parâmetros, utilizados para modelar equações de fluxos e (iv) conectores, que representam as inter-relações entre os outros elementos. A Tabela 2.2 disponibiliza a simbologia dos elementos do diagrama de estoques e fluxos.

Tabela 2. 2 - Simbologia utilizada nos diagramas de estoques e fluxos

Simbologia	Descrição
	Estoque – Utilizados para acumulo de uma determinada informação no tempo.
	Conectores – Identificado por uma linha com uma seta que aponta a direção que a informação percorre. Indica troca de informação entre duas variáveis.
	Ligação com atraso – Informação entre variáveis cuja origem se deu no passado.
	Variável – Informação dinâmica que possui ação comportamental no tempo. Em geral são funções que sofrem alterações em escala temporal e liberam informações para os fluxos.
	Fluxo – Representado com uma seta de linha dupla que aponta a direção que o fluxo percorre. Indica troca de matérias entre estoques no tempo.
	Auxiliares ou parâmetro – Informação que o usuário do sistema tem acesso durante o processo de simulação e pode alterar.
	Informações fora da estrutura do sistema.

Os estoques são considerados elementos fundamentais de qualquer sistema (MEADOWS, 2009). Eles são de fácil identificação, pois são elementos que podem ser vistos, sentidos, ou mensurados. Um estoque representa uma quantidade de matéria, informação ou energia que é acumulada em escala temporal (FORRESTER, 1969). Os fluxos são funções que absorvem informações de várias variáveis de referência e afetam o valor do estoque de forma positiva ou negativa. Os fluxos são considerados fluxos de entrada quando afetam o estoque positivamente e fluxos de saída quando afetam o estoque negativamente.

Durante a modelagem utilizando diagramas de estoques e fluxos, devemos seguir as seguintes regras (FLOOD; JACKSON, 1991):

1. Um estoque pode somente ser precedido por um fluxo.
2. Um estoque pode ser sucedido por um auxiliar ou um fluxo.
3. Um auxiliar pode ser sucedido por um estoque.
4. Um fluxo pode ser sucedido por um estoque.
5. Um estoque não pode ser diretamente afetado por outro estoque.

Segundo Reibstein e Chussil (1999), a adoção de tais técnicas para simulação oferece os seguintes benefícios durante as tomadas de decisões:

1. Compressão do tempo: Durante a simulação o tempo pode ser acelerado, o que possibilita análise dos fenômenos do sistema em tempo futuro.
2. Custo reduzido: Com o modelo computacional é possível verificar possíveis problemas do sistema para planejar melhores ações de contorno antes que o problema realmente ocorra.
3. Captura de conhecimento: A modelagem e simulação capturam e codificam o conhecimento acumulado sobre as estruturas dos sistemas.
4. Capacidade de experimentação: A modelagem e simulação auxiliam no conhecimento de possíveis acontecimentos e possíveis alternativas sem precisar ocorrer no ambiente real.

### **2.2.2 Aplicações de dinâmica de sistemas**

Para o tratamento adequado das características dinâmicas, como já visto, é necessário estabelecer regras do sistema que formam uma estrutura ordenada do funcionamento do sistema. Atualmente já existem estruturas na literatura aplicadas para diversas áreas: agrícola, industrial, social e econômica. (FORRESTER, 1961, 1969, 1971b, 1991; MEADOWS, 1970).

Uma aplicação de DS é o modelo “*Urban Dynamics*” (FORRESTER, 1969), que explica o padrão de crescimento populacional, em áreas urbanas, subsequente de um declínio. Este modelo permite compreender e prever em escala temporal, sobretudo em longo prazo. Outros modelos surgiram, dentre eles o modelo “*World Dynamics*” (FORRESTER, 1972) que expõe os problemas do crescimento econômico e populacional sem regras sustentáveis (FORRESTER, 1972).

A partir dos estudos de Forrester, outros modelos foram desenvolvidos utilizando DS, dentre eles o modelo matemático proposto por Meadows *et al.* (1972) conhecido como “*WORLD3*”, com o propósito de ajustar condições e projeções quanto a sustentabilidade considerando os seguintes elementos: (i) população; (ii) capital; (iii) alimentação; (iv) recursos naturais não renováveis e (v) poluição.

### **2.3 Ambientes computacionais para modelagem de sistemas espaciais.**

A tomada de decisão sobre como as ações humanas impactam sistemas naturais necessitam de ferramentas que oferecem suporte para desenvolvimento de modelos que capturam representações destes impactos humanos no ambiente (CARNEIRO *et al.*, 2013). Estas representações podem ser modeladas em ambientes de modelagem espaciais, os quais oferecem suporte para trabalhar com dados temporais e espaciais. Existem vários ambientes para modelagem espacial disponíveis na literatura, os quais utilizam diferentes técnicas para manipulação e tratamento da espacialização dos dados, como autômatos celulares (Von NEUMANN, 1966), sistemas baseados em agentes (WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1995; ANDRADE, 2009) e álgebra de mapas (TOMLIN, 1990). Nesta seção é detalhado um ambiente de modelagem espacial, TerraME, que utiliza técnicas de modelagem espacial flexíveis e provê ao modelador o uso de múltiplos paradigmas para modelagem.

O ambiente de modelagem espacial TerraME (CARNEIRO, 2014) foi desenvolvido pela parceria entre o Laboratório para Modelagem e Simulação

de Sistemas Terrestres (TerraLAB) da Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a fim de prover uma linguagem de modelagem de alto nível para descrição de modelos dinâmicos espacialmente explícitos, integrado a um banco de dados geográficos (LANA, 2009; CARNEIRO, 2003).

O TerraME usa a linguagem Lua (IERUSALIMSKY et al., 1996) para oferecer ao modelador abstrações como os conceitos de escala, trajetória, autômatos celulares aninhados, matriz de vizinhança generalizada e agente. A capacidade deste ambiente de integrar modelos comportamentais com dados espaciais armazenados em um banco de dados geográfico ofereceu suporte para desenvolvimento de vários trabalhos, como modelos de mudança de uso e cobertura do solo da Amazônia (AGUIAR, 2005; CÂMARA et al., 2005); simulação de propagação de incêndio em parques nacionais (ALMEIDA et al., 2008), simulação de processos hidrológicos em áreas urbanas (PEREIRA, 2008) e propagação de doenças como dengue (LANA, 2009). O TerraME é um software de código aberto, distribuído sob a licença GNU LGPL e está disponível pelo [www.terrame.org](http://www.terrame.org). A arquitetura do TerraME é mostrada na Figura 2.2 e é descrita por Carneiro et al. 2013 como:

*“O nível mais baixo utiliza a biblioteca C++ TerraLib (Câmara et al., 2008). O segundo nível oferece suporte para modelagem em C++, incluindo paradigmas baseados em agentes, espaço celulares, sistemas orientados e baseados em eventos. O terceiro nível é a interface entre TerraME e Lua. Nós adicionamos os tipos de dados e funções para simulação do modelo e avaliação para Lua. Outras bibliotecas matemáticas e estatísticas pode ter suas APIs exportadas para o interpretador Lua. A camada seguinte é o interpretador Lua, que tem o código-fonte do modelo como entrada e executa a simulação. A última camada consiste nos modelos do usuário final.”*

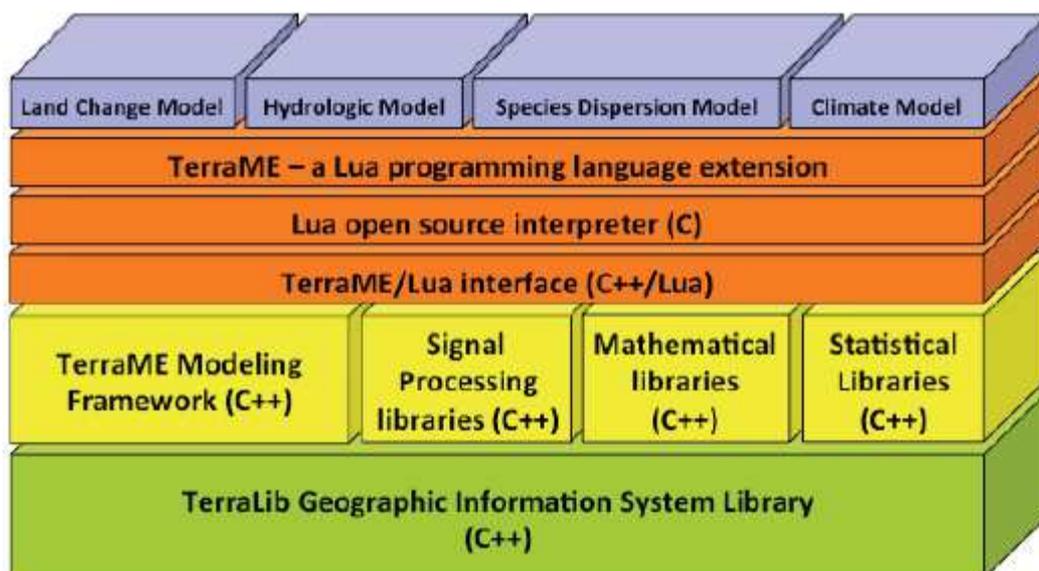


Figura 2.2 – Arquitetura do TerraME

Fonte: Carneiro et al. (2013)

O TerraME considera modelagem em três dimensões, sendo elas espacial, temporal e comportamental. A dimensão temporal é referente ao período considerado pelo modelo para simulação e a frequência com que ocorrem as mudanças. Quanto à referência espacial, no TerraME são providos quatro tipos: células, espaços celulares, vizinhança e trajetória (CARNEIRO et al., 2013).

A célula é uma representação multivalorada do espaço. O espaço celular é um conjunto de células, o qual representa uma área geográfica, dividida em partições regulares ou irregulares, que são armazenados e recuperados a partir de um banco de dado. (CARNEIRO et al., 2013). Cada entidade de um banco de dados espacial como, célula, pixel, ponto, linha e polígono, é carregada como uma célula no TerraME (CARNEIRO et al, 2013).

## 2.4 Dinâmica de sistemas espaciais

Dinâmica de Sistemas Espaciais é uma abordagem relativamente nova de Dinâmica de Sistemas (HARTT, 2011), baseada em processos dinâmicos que envolvem escala temporal e espacial. Esta abordagem oferece técnicas para modelagem de sistemas complexos com processos dinâmicos em tempo

e espaço que necessitam trabalhar com realimentação, para visão sobre as interações entre os diferentes componentes do sistema. Pode ser usada para modelar uma variedade de processos físicos e naturais, onde o principal interesse é a interação espaço-tempo. Nesta seção são discutidas as vantagens desta abordagem.

Modelos relacionados à mudança de uso e cobertura do solo, processos hidrológicos em áreas urbanas ou propagação de doenças baseiam-se em análise de dados espaciais com representação das condições iniciais para projeções de estados futuros do sistema.

A extração das informações geradas com a simulação da estrutura do sistema em um ponto futuro formam os cenários. As projeções disponibilizam diversos atributos provenientes das diferentes áreas do conhecimento. As projeções possibilitam, também, compreender como determinados atributos se relacionam. (CÂMARA et al., 1996); (CÂMARA et al., 2000); (CÂMARA et al., 2008).

Em modelos que utilizam dados especializados, tais como os modelos para estudos do plantio de trigo por Siqueira et al. (2001), milho e soja por Pinto et al. (2002), café por Assad et al. (2004), milho, feijão, arroz, soja e café por Nobre et al. (2005) e outros estudos que contemplam efeitos sobre pragas, doenças, solos (ERICKSEN et al., 2009), os cenários proveem melhor visualização e entendimento da dinâmica de um sistema representados no espaço em um determinado tempo (CELLIER, 2008).

A fusão de conceitos espaciais com dinâmica de sistemas é discutida em várias abordagens (HARTT, 2011; NEYERGES, 1991; DESPOTAKIS et al. 1991; GROSSMAN; EBERHARDT 1992; GROOTHEDDE, 2000), porém, a abordagem de Dinâmica de Sistemas Espaciais possui várias limitações espaço-temporais existentes. Dentre elas podemos citar a apresentação de cenários para suporte de análise com foco na escala espaço temporal e a conexão entre diferentes modelos espaciais (AHMAD; SIMONOVIC, 2004).

No capítulo seguinte, uma extensão para modelagem espacial de Dinâmica de Sistemas para o ambiente TerraME é apresentada e explorado as vantagens, principalmente as que podem ser obtidas utilizando o uso de funções padronizadas para trabalhar com realimentação. Considerando que, para o desenvolvimento de modelos, é possível abstrair informações necessárias para utilização de tais técnicas, permitindo foco na análise de regras e do sistema e nos cenários com visão especializada.

### **3 EXTENSÃO DO TERRAME PARA MODELAGEM ESPACIAL DE DINÂMICA DE SISTEMAS**

Após levantamento das necessidades para trabalhar com Dinâmica de Sistemas Espaciais em modelos de produção agrícola, foi estudada a hipótese de que a chave para trabalhar com espacialização de dados na abordagem de Dinâmica de Sistemas corresponde à modelagem integrada das variáveis de estoque com a espacialização da região estudada, possibilitando variações quantitativas e espaciais no tempo. As funções-base e estruturas de Dinâmica de Sistemas foram implementadas como uma extensão para o ambiente de modelagem espacial TerraME, para oferecer suporte dos modelos espaciais com Dinâmica de Sistemas.

#### **3.1 Extensão do TerraME para modelagem espacial com Dinâmica de Sistemas**

Nesta seção, apresentamos a integração de técnicas de Dinâmica de Sistemas (DS) no ambiente de modelagem espacial TerraME e uma análise das vantagens obtidas com a utilização da extensão proposta para implementação de alguns exemplos de sistemas espaciais.

Para trabalhar com a metodologia de Dinâmica de Sistemas Espaciais, dois requisitos são essenciais. Primeiro, a metodologia deve possibilitar o uso completo do ambiente de modelagem espacial sem limitações, ou seja, possibilitar que qualquer funcionalidade nativa do ambiente de modelagem espacial possa ser utilizada. Segundo, ela deve representar e manter as relações espaciais dentro da área de estudo de DS.

Embora, o conceito de integração de modelagem espacial e DS tenha sido discutido a partir de várias diferentes abordagens (NYERGES, 1991; DESPOTAKIS, et al 1991; GROSSMAN; EBERHARDT 1992; GROOTHEDDE, 2000; AHMAD; SIMONOVIC, 2004; HARTT, 2011), existem vários fatores que limitam a utilização das técnicas de DS para análise espacial, principalmente ao trabalhar com complexas estruturas que envolvem acumulações de matéria

e/ou energia com representação espacial e fluxos que consideram realimentações e atrasos.

A alternativa para trabalhar com a dinâmica espacial integrada com DS proposta neste trabalho é espacializar os estoques de DS, oferecendo suporte para trabalhar com multiparadigmas de modelagem espacial. A extensão de Dinâmica de Sistemas proposta para o TerraME implementa técnicas de DS para estoques espacializados.

Existem diferentes formas de modelar estruturas de sistemas utilizando técnicas de DS levando em consideração a localização. Neste trabalho, a integração de técnicas de DS com tipos de dados espaciais foi realizada através de uma adequação na variável de estoque, a qual foi estendida para variar tanto em escala temporal quanto em escala espacial utilizando o tipo célula ou espaço celular.

Os estoques espacializados possibilitam a realimentação de informação, quanto à localidade, dimensão e quantidade, para fluxos que afetam os dados desses estoques. O ganho de trabalhar com estoques que contém tanto dados quantitativos e descritivos quanto espaciais está na utilização de fluxos que trabalham com operações geográficas como área, sobreposição e vizinhança para afetarem o estado de um estoque. Além das vantagens de utilização das operações geográficas com técnicas de DS, é possível também representar fenômenos como deslocamento, expansão, dissipação e concentração de um estoque no espaço.

A geração de cenários utilizando o estoque proposto oferece suporte para a análise histórica, no espaço e tempo e possibilita a análise de como os estoques são influenciados devido à localização dos elementos do sistema. A Figura 3.1 ilustra a espacialização do estoque com o conceito de espaço celular.

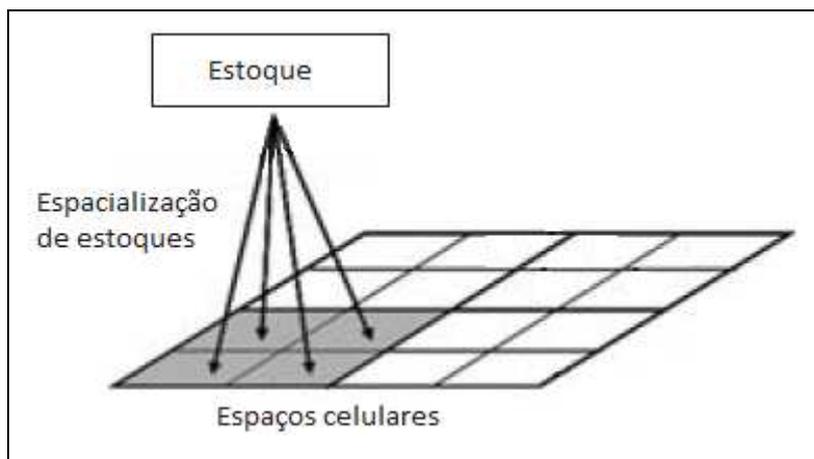


Figura 3.1 - Estoques espacializados de Dinâmica de Sistemas Espaciais

Diferentes estoques podem possuir a mesma referência espacial, e, se afetar ou não diretamente. Desta forma, ao invés de simplesmente levar em consideração como variáveis  $X$  afetam outras variáveis  $Y$  e como variáveis  $Y$  afetadas respondem a variáveis  $X$ , é possível, também, levar em consideração a localização das variáveis representada por uma terceira variável  $Z$ .

A forma de alteração do estado quantitativo de um estoque deve ser a mesma utilizada na abordagem de DS, ou seja, através de fluxos representados por funções, que podem mudar o valor e/ou localização do estoque no tempo. Os fluxos são representados por conjunto de equações que manipulam dados espaciais e atualizam o estado espacial do estoque para cada tempo de simulação. As conexões entre fluxos e estoques estabelecem a dinâmica do sistema espacial.

A modelagem de Dinâmica de Sistemas Espaciais necessita de expansão das definições da localização geográfica de Andrade et al. (2008), esta expansão permite análise de como a área, localização e quantidade afetam a estrutura do sistema, o que significa que as relações quantitativas de um estoque em uma determinada região (Estoque-Célula) influenciam nos fluxos e nas relações quantitativas de outros estoques de mesma região (Célula-Estoque). Exemplos dessas relações são os modelos de produções agrícolas e modelos de ciclos de fósforo e nitrogênio em uma mesma

localização, onde as produções agrícolas podem alterar a quantidade de estoque de fósforo e nitrogênio (ANTLE, E STOOTVOGEL, 2003), alterando um fluxo, o que ocasiona impactos no ambiente se ultrapassarem um determinado limite (ROCKSTROM et al., 2009; STERN, 2007; FOLEY et al., 2005; MEA, 2005a).

Como a área geográfica afetada pelo sistema pode ser composta de zero, uma ou mais células, a relação Estoque-Célula é de 0:N, uma vez que um estoque pode estar localizado em uma, várias ou até mesmo nenhuma célula, como ilustrado na Figura 3.2.

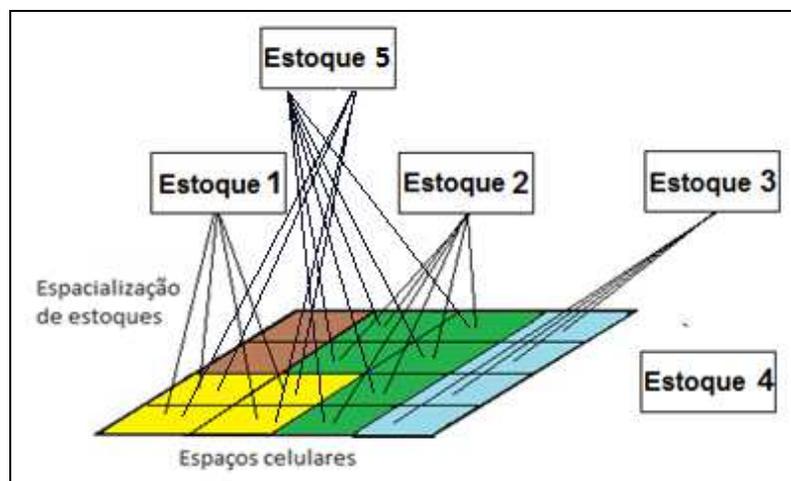


Figura 3.2 – Relação de Estoques-Células para diferentes produções agrícolas

Da mesma forma, em um espaço celular, uma célula pode estar relacionada com nenhum, um ou vários estoques. A relação Célula-Estoque é de também de 0:N.

Formalmente a descrição das relações ( $R_{EC}$ ) de Estoque E, com Célula C e relações ( $R_{CE}$ ) de Célula C, com Estoque E n é:

$$R_{EC} : E \times C \rightarrow \{0,n\}$$

$$R_{CE} : C \times E \rightarrow \{0,n\}$$

Estoques podem se deslocar de um conjunto de células para outro em um determinado momento. Isto ocorre através de ações de fluxos em estoques, afetando dados espaciais e/ou quantitativos. As definições acima apresentadas atendem à demanda de representação espacial para a abordagem de Dinâmica de Sistemas Espaciais.

Nós seguimos as relações de Estoque-Fluxo e Fluxo-Estoque definidas por Forrester et al. (1961) para possibilitar variação espacial de Estoques em escala temporal.

Na abordagem de Dinâmica de Sistemas, a única forma de interação e conexão entre estoques é através de fluxos. Matéria e/ou energia de um estoque pode ser transformada em outro tipo de matéria e/ou energia, podendo servir de alimentação, através de fluxos, para outro estoque de tipo diferente. Esta transformação é representada por fluxo de saída de um estoque, cujo mesmo fluxo pode ser fluxo de entrada para outro tipo de estoque. Assim um fluxo pode possuir 1 ou 2 estoques. Quando o estoque possui um único fluxo, ele recebe ou envia informações para o universo externo ao do sistema, o que significa que este sistema é aberto.

Formalmente a relação ( $R_{EF}$ ) entre Estoque E, com Fluxo F e relação ( $R_{FE}$ ) entre Fluxo F, com Estoque E estão definidas como:

$$R_{EF} : E \times F \rightarrow \{1,n\}$$

$$R_{FE} : F \times E \rightarrow \{1,2\}$$

A abordagem tradicional de Dinâmica de Sistemas (FORRESTER, 1961), define variáveis auxiliares, também conhecidas como parâmetros (FORRESTER, 1961; MEADOWS et al. 1972), que são geralmente utilizadas por cálculos. Estas variáveis são informações que o modelador do sistema tem acesso antes ou durante o processo de simulação e podem ser modificadas para alterar o comportamento do sistema (FORRESTER et al., 1961; MEADOWS et al. 1972).

### **3.2 Arquitetura da extensão para o TerraME para modelagem de Dinâmica de Sistemas Espaciais**

A extensão de Dinâmica de Sistemas Espaciais proposta acrescenta uma nova camada para utilização de técnicas de DS na arquitetura do ambiente de modelagem TerraME, organizada para oferecer suporte à modelagem espacial, simulação e apresentação dos cenários com mapas e gráficos com a transformação histórica dos Estoques.

As camadas 1, 2 e 3 da Figura 3.5 representam a arquitetura do ambiente de modelagem espacial TerraME, que oferece suporte para modelagem espacial usando abordagens tradicionais. No ambiente TerraME (Figura 2.2), a camada 4 foi acoplada, denominada “Extensão para modelagem espacial de Dinâmica de Sistemas”, que oferece suporte a funcionalidades com técnicas tradicionais de DS, adaptadas para a espacialização do estoque. Tais funcionalidades, cuja implementação é apresentada na próxima seção, podem ser utilizadas pelas duas principais estruturas da extensão proposta que representam os elementos: (i) Estoques espacializados e (ii) Mundo, o modelo como um todo para o universo representado. A estrutura Mundo define o conjunto de estoques pertencentes ao modelo de interesse estipulado para a simulação, conforme determinado pelo analista.

A Figura 3.5 apresenta a arquitetura em camadas da extensão proposta. A camada 5, que utiliza as funcionalidades da camada 4, é dividida em vários módulos que representam os modelos para a simulação desejada que utilizam as novas funcionalidades de Dinâmica de Sistemas Espaciais. Essa camada corresponde a camada 5 da Figura 3.5.

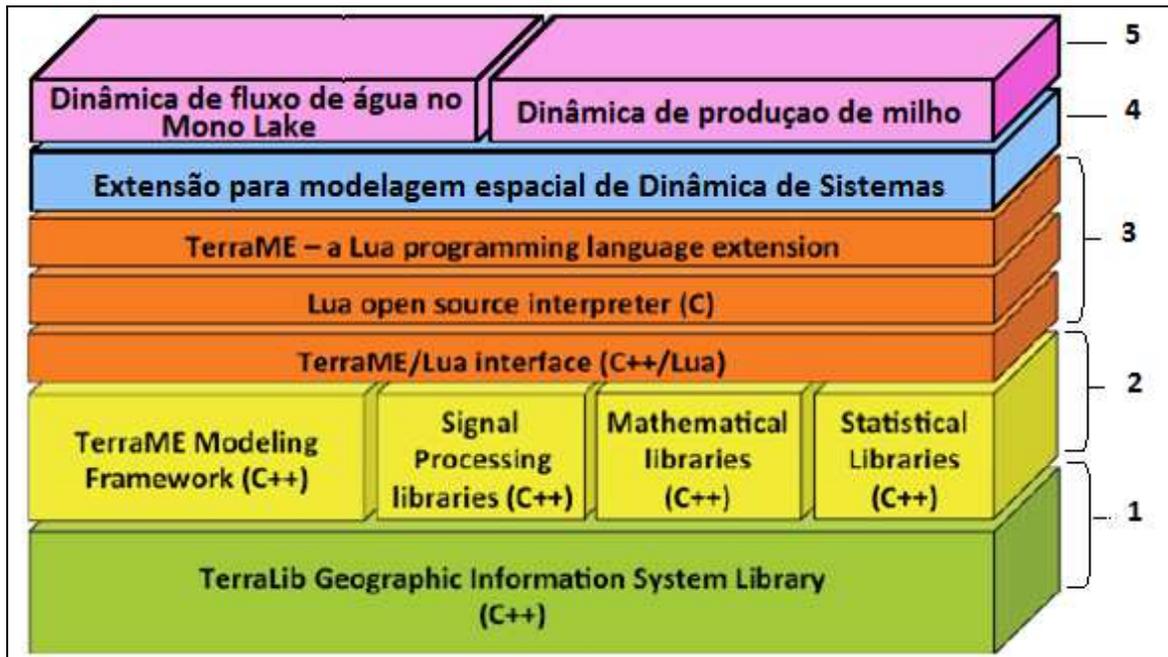


Figura 3.5 - Arquitetura da extensão do TerraME para modelagem espacial de Dinâmica de Sistemas.  
 Fonte: Adaptado de Carneiro et al. (2013)

### 3.3 Implementação da extensão de Dinâmica de Sistemas Espaciais para o ambiente de Modelagem TerraME

Uma vez definidas as relações necessárias para a abordagem de Dinâmica de Sistemas Espaciais e a arquitetura da extensão, foi implementado a extensão proposta como uma extensão da linguagem Lua [Ierusalimschy et al., 1996] para o ambiente de modelagem TerraME. Os elementos e estruturas (Estoque, Fluxo de entrada, Fluxo de saída, Parâmetros e Mundo) foram dados em inglês (Stock, Inflow, Outflow, Parameter e World).

#### 3.3.1 Implementação do Estoque Especializado

Com o intuito de padronizar a forma de desenvolvimento de modelos utilizando esta extensão, a estrutura *Stock* foi implementado conforme a estrutura descrita:

```

-- Stock
-- spatialStock variables -----
Stock = {spatialStock,      -- spatial spatialStock location represented with Cellular Space
         location,         -- set of spatial spatialStock coordinates
         stockTotalValue, -- represents the total quantity value of a stock
         inflows,          -- set of inflows functions
         outflows,         -- set of outflows functions
         xdim,             -- set map's number of columns, in the case of creating a
                           --   cellarspace with no need to load from a database.
         ydim,             -- set map's number of columns, in the case of creating a
                           --   cellarspace with no need to load from a database.
         showMap,          -- true if spatialStock is to be shown on map
         name,             -- stock name
         unit,             -- stock unit
         uniqueID          -- stock unique ID
        }

```

Onde *Stock* é do tipo tabela na linguagem Lua com a variável *spatialStock*, que representa um espaço celular para armazenar: O *Stock* também possui as variáveis: (i) *location*, uma tabela para armazenar um conjunto de coordenadas X e Y que representam a referência espacial do estoque. A tabela *location* possui as subtabelas: (a) *coordX*, para armazenar o conjunto de coordenadas X e (b) *coordY*, para armazenar o conjunto de coordenadas Y; (ii) *stockTotalValue*, variável para guardar o valor total acumulativo do *spatialStock*; (iii) *Inflows* e *Outflows*, tabelas para funções que representam os fluxos de entrada e saída que manipulam dados do *SpatialStock*; (iv) *xdim* e *ydim*, que representam a dimensão X e Y para iniciar o espaço em número de células; (v) *showMap*, variável do tipo booleana para verificar se o *SpatialStock* será exibido no mapa do cenário final; (vi) *name*, nome do estoque; (vii) *unit*, variável para armazenamento da unidade básica do valor do estoque e (viii) *uniqueID*, identificador único do *Stock*. O *uniqueID* pode ser utilizado quando o *Stock* necessita ser recuperado para captura do valor total a ser usado como parâmetro.

As funções que representam os fluxos podem ser específicas para o problema do modelo. Estas funções de fluxos podem utilizar chamadas para funções tradicionais da abordagem de Dinâmica de Sistemas implementadas para utilização no TerraME.

Para determinar os fluxos de entrada, saída e espacial do estoque especializado, foram implementados, respectivamente, os métodos *insertInflow*, *insertOutflow*, onde o parâmetro *funcArg* passado para o método é uma função que representa um fluxo, conforme mostrado na estrutura abaixo:

```
-- Stock INSERT INFLOW -----
-- @param function funcArg - represents a flow
function Stock.insertInflow(funcArg)
    -- Inserts function on the last position
    table.insert(self.inflows, funcArg)
end

-- Stock INSERT OUTFLOW -----
-- @param function funcArg - represents a flow
function Stock.insertOutflow(funcArg)
    -- Inserts function on the last position
    table.insert(self.outflows, funcArg)
end
```

O acesso e atribuição das variáveis presentes na estrutura *SpatialStock* devem ser realizados usando as funções destinadas para tal funcionalidade. Estes e outros métodos desta estrutura estão descritos com detalhes no Apêndice A.

### 3.3.2 Implementação da estrutura Mundo

A estrutura *World* é uma tabela que representa uma aglutinação das partes do modelo, cujo comportamento será analisado em um tempo determinado.

O *World* possui a variável *stocks*, que é representada por uma tabela em LUA para armazenar os estoques do modelo. A estrutura contém, também, as variáveis: *auxiliary*, que representa uma tabela com funções que alimentam informativamente os fluxos dos estoques, resultando em possíveis variações dos mesmos; *start*, para armazenar o início do tempo da simulação do modelo; *dt*, o valor de intervalo diferencial de tempo, *spatialName*, para armazenar o

nome da representação espacial do modelo; *spatialUnit*, para armazenar a unidade padrão do espaço celular; *xdim*, número de colunas no mapa de representação do modelo; *ydim*, número de linhas no mapa de representação do modelo; *legend*, que contém dados para construção do mapa de representação espacial do modelo; *showMap*, variável do tipo booleana que quando verdadeira, apresenta o mapa com os estoques no cenário da simulação; e, *showGraph*, variável do tipo booleana que quando verdadeira, apresenta gráficos com variações dos estoques no cenário da simulação. Por padrão, os valores de *showGraph* e *ShowMap* são iniciados como verdadeiros, mas podem ser atribuídos com valor falso pelo modelador.

O tipo de dado *World* foi implementada conforme estrutura abaixo:

```
-- World
-- World variables -----
World = {
    stocks,      -- set of Space Stocks
    auxiliary,   -- set of auxiliary functions
    start,       -- simulation start time
    dt,          -- simulation dt
    timeClock,   -- simulation timeClock
    worldName,   -- name for map scenario
    spatialUnit, -- value for cellular space unit
    legend,      -- spatial map's legend
    xdim,        -- number of columns, in the CellularSpace for scenario
    ydim,        -- number of rows, in a CellularSpace for scenario
}
```

Para determinar as funções auxiliares que alimentam informativamente os fluxos de entrada e saída dos estoques especializados, foi implementado o método *insertParameter*, onde o parâmetro *funcArg* passado para o método é uma função que retorna um valor que pode ser utilizado por um ou mais estoques do mundo. Esta função foi implementada conforme estrutura abaixo:

```
-- World INSERT STOCK -----  
-- @param stockArg - Stock to be inserted  
function World.insertStock(stockArg)  
    -- Inserts function on the last position  
    table.insert(self.stocks, stockArg)  
end
```

Um dos principais métodos da estrutura *World* é o *update*, responsável por reconhecer os fluxos de entrada e saída de cada estoque espacial, calculá-los para o tempo desejado e atualizar os valores dos estoques. Este método recebe como parâmetro as variáveis *stockVariable*, um estoque especializado do tipo *spatialStock* e *timClock*, o tempo presente da simulação.

O método *run(endTime)*, executa a simulação do modelo até o tempo final *endTime* especificado.

O Apêndice B contém informações sobre outras funções implementadas que oferecem suporte a estrutura *World*.

### **3.4 Funções de Dinâmica de Sistemas implementadas para reutilização em modelagem espacial**

Examinando-se os padrões de comportamento dos estoques espaciais, as funções padrões de DS foram adaptadas e implementadas para reutilização durante a implementação de modelos. As principais funções implementadas são:

Função de crescimento controlado por porcentagem do estoque - *controlledGrowth(percentage)* – controla o crescimento do estoque para que não ultrapasse um limite de crescimento durante o tempo de simulação, baseado no valor quantitativo do estoque.

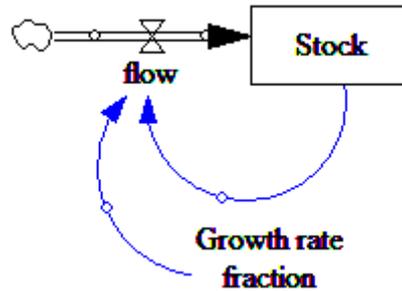


Figura 3.6 – Diagrama de Estoque e fluxo da função *controlledLevelGrowth(percentage)*

Função de crescimento controlado por porcentagem do estoque e nível - *controlledLevelGrowth(percentage, level)* – controla o crescimento do estoque para que não ultrapasse um limite de crescimento no diferencial de tempo, baseado no valor quantitativo do estoque até que o estoque atinja um determinado nível.

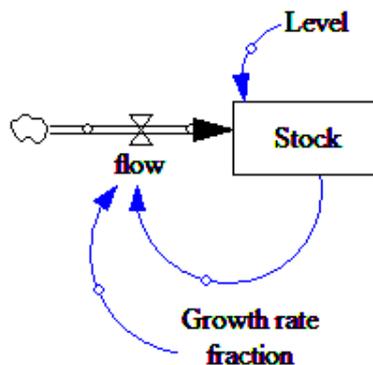


Figura 3.7 – Diagrama de Estoque e fluxo da função *controlledLevelGrowth(percentage, level)*

Função *controlledLevelDecay(percentage, level)* – permite que um estoque decaia no diferencial de tempo até um limite estabelecido, baseado em uma porcentagem de quantidade do estoque no tempo determinado, até atingir um determinado nível.

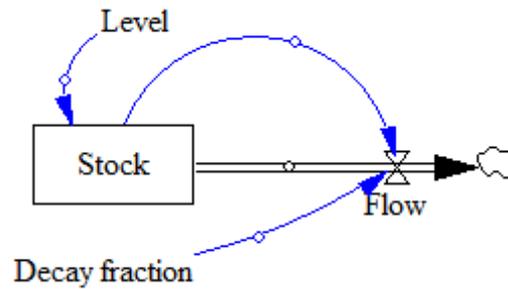


Figura 3.8 – Diagrama de Estoque e fluxo da função `controlledLevelDecay(percentage, level)`

Função `delay1(input, delayDuration, initial)` – função utilizada para calcular o atraso de resposta de primeira ordem para um fluxo. A técnica utilizada para simular o atraso das respostas dos fluxos no tempo.

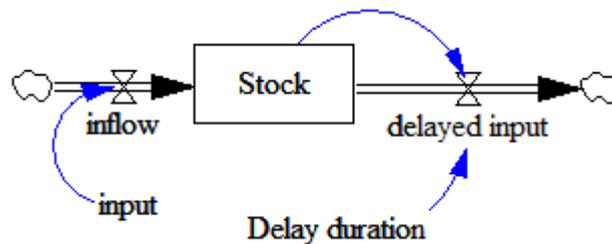


Figura 3.9 – Diagrama de Estoque e fluxo da função `delay1(input, delayDuration, initial)`

Função `Delay3(input, delayDuration, initial)` – função utilizada para simular o atraso de terceira ordem de um fluxo utilizando cálculos exponenciais que alteram o valor do fluxo durante o atraso especificado.

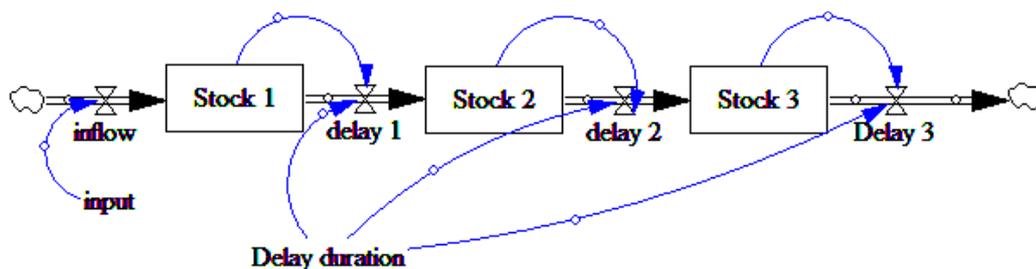


Figura 3.10 – Diagrama de Estoque e fluxo da função `delay3(input, delayDuration, initial)`

Função *trendExtrapolation* (*input*, *time*, *horizon*, *initial*) – função calcula a tendência de extrapolação de um fluxo baseado no valor do fluxo de entrada, tempo médio de duração do fluxo e média de valor de alimentação do estoque de um início estimado até o tempo presente. A função retorna o valor da tendência de fluxo extrapolado no tempo futuro.

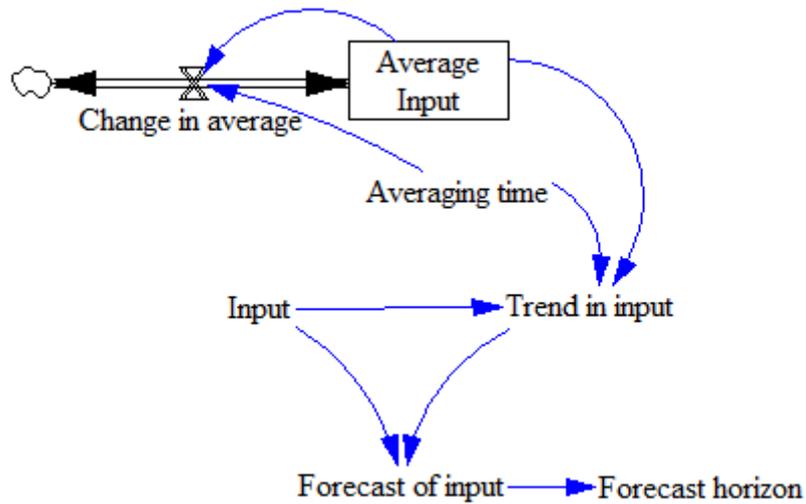


Figura 3.11 – Diagrama de Estoque e fluxo da função *trendExtrapolation* (*input*, *time*, *horizon*, *initial*)

Função *smth1*(*input*, *time*, *initial*) – o comportamento desta função é similar com o da função de atraso de primeira ordem, porém a função calcula a curva de suavidade de primeira ordem para um fluxo utilizando o tempo médio para um valor inicial alcançar um valor de *input*.

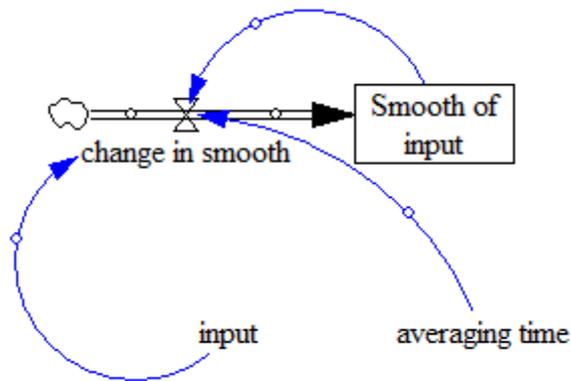


Figura 3.12 – Diagrama de Estoque e fluxo da função  $smth1(input, time, initial)$

Função  $Smth3(input, time, initial)$  – função que calcula curva de suavidade de terceira ordem para um fluxo utilizando o tempo médio para um valor inicial alcançar um valor de  $input$ .

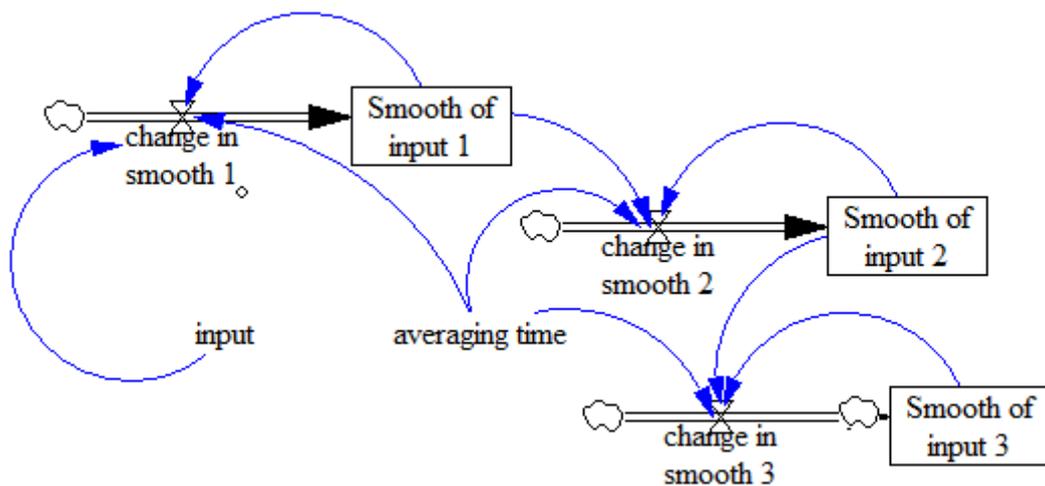


Figura 3.13 – Diagrama de Estoque e fluxo da função  $smth3(input, time, initial)$

### 3.5 Modelos simplificados implementados com a extensão proposta para o ambiente de modelagem TerraME

Nesta seção fazemos uma comparação da implementação de modelos simplificados utilizando a extensão proposta com implementações sem a

utilização da extensão. O objetivo está em avaliar os ganhos da utilização da extensão e não na validação dos modelos.

Um dos modelos mais simples de Dinâmica de sistemas é o sistema de troca de água de uma banheira. Apesar de ser um modelo simplificado, ele possibilita fácil demonstração de propriedades do estoque e de uso de fluxos que são os elementos chaves da abordagem de Dinâmica de Sistemas. A Figura 3.14 demonstra o diagrama de estoque e fluxo deste modelo.

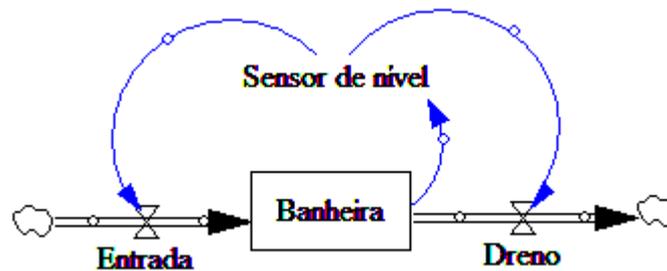


Figura 3.14 – Diagrama de Estoque e fluxo do modelo de troca de água da banheira

A implementação deste modelo utilizando a extensão de Dinâmica de Sistemas no TerraME possibilitou avaliar a utilização dos conceitos básicos de Dinâmica de Sistemas. Abaixo temos duas implementações deste modelo:

### 3.5.1 Implementação do modelo da banheira utilizando a extensão proposta.

Para implementar o modelo utilizando a extensão proposta, primeiramente definimos quais são os estoques a serem utilizados:

```
--Initializes Stock and World
bathTube = Stock:startStock()
w        = World:startWorld()
```

Na implementação deste modelo, definimos a variável bathTube como o estoque. A letra “w” foi definida para representar a estrutura World para simular o modelo implementado.

As funções de fluxo foram implementadas dentro do padrão especificado, conforme demonstrado na implementação abaixo. Posteriormente elas serão especificadas como do tipo fluxo e entrada ou fluxo de saída do estoque:

```
-- OUTFLOW 1 -----
local outflow = function()
  local waterOut = 5
  return waterOut
end

-- INFLOW 1 -----
local inflow = function()
  local waterIn = 5
  if bathTube.getTimeClock() > 5 then
    return waterIn
  else
    return 0
  end
end

end
```

Após definirmos o estoque e funções de fluxo, especificamos o modelo conforme demonstrado abaixo:

```

_*****\
-- Stock: water in tub(t) = water in tub(t - dt) + (inflow - outflow) x dt
-- Initial stock value: water in tub = 50 Liters
-- t = minutes
-- dt = 1 minute
-- Run time = 15 minutes
-- Inflow: inflow = 0 L/min . . . for time 0 to 5; 5 L/min . . . for time 6 to 15
-- Outflow: outflow = 5 L/min]
_*****\
-- Andre Chiarell
bathTube:setStock(50)
--Insert Inflow
bathTube:insertInflow(inflow)
--Inser Outflow
bathTube:insertOutflow(outflow)
--Insert Stock into the World
w:insertStock(bathTube)
--Load legend
--Run the model from 1 to 15
w.start = 1
w.dt = 1
w.run(20)

```

O estoque especializado recebe os fluxos de entrada com a função inflow() implementada anteriormente e fluxo de saída com a função outflow().

Após a especificação de parâmetros necessários para o estoque, o inserimos no World, representado pela variável “w”, definimos o nome do modelo através da função setMapName e unidade através da função setUnit.

Para a simulação foi definido um tempo e início igual a um com um diferencial de tempo igual a um que será simulado durante 20 unidades de tempo.

**3.5.2 Cenários gerados do modelo banheira com a extensão proposta.**

A simulação do modelo implementado no item anterior gerou, utilizando componentes do ambiente TerraME, o gráfico abaixo:

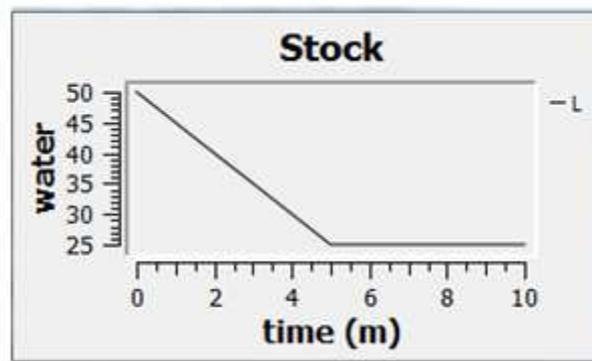


Figura 3.15 – Cenário do modelo de troca de água da banheira com fluxo de entrada após 20 min

### 3.5.3 Implementação do modelo banheira sem a extensão proposta.

Poderíamos implementar o modelo, sem a extensão proposta, de diversas formas. Para este exemplo utilizamos a implementação abaixo:

```

-- Bathtub—for Figures 5, 6 and 7
_*****\
-- Stock: water in tub(t) = water in tub(t - dt) + (inflow - outflow) x dt
-- Initial stock value: water in tub = 50 Liters
-- t = minutes
-- dt = 1 minute
-- Run time = 15 minutes
-- Inflow: inflow = 0 L/min . . . for time 0 to 5; 5 L/min . . . for time 6 to 15
-- Outflow: outflow = 5 L/min]
_*****\
-- Andre Chiarelli

tub = Cell {
  name = "bathtub",
  stock = 50,
  inflow = 0,
  outflow = 5
}

tub:createObserver(OBSERVERS.DYNAMICGRAPHIC,
  {"stock"},
  {
    "Stock",
    "L",
    "time (m)",
    "water"
  }
)
tub.stock = 50
print([[Tub water initial stock is ]].tub.stock)
tub:notifyObservers(0)
for t=1, 10, 1 do
  if t > 5 then
    tub.inflow = 5
  end
  tub.stock = tub.stock + (tub.inflow - tub.outflow)
  print([[Tub water stock in the moment ]].t. [[min, by gals = ]].tub.stock)
  tub:notifyObservers(t)
end

print(tub.TYPE)
print(tub.NAME)
_wait = io.read()

```

### 3.5.4 Cenários gerados do modelo banheira sem a extensão proposta.

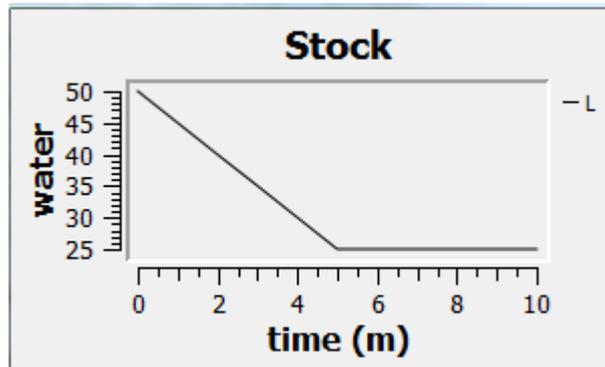


Figura 3.16 – Cenário do modelo de troca de água da banheira sem fluxo de entrada após 20 min

A implementação deste modelo simplificado com a extensão proposta nos possibilita primeiramente verificar uma padronização ao desenvolver modelos. Estoque e fluxo são facilmente identificados. Além desta fácil identificação, podemos também verificar que com a padronização, as estruturas implementadas para este modelo são também facilmente reutilizáveis, o que nos permite trabalhar constantemente com componentização (implementação de componentes utilizáveis em outros modelos).

Outra verificação que fizemos foi que ao implementar modelos utilizando a extensão proposta, modeladores podem abstrair as implementações base de Dinâmica de Sistemas. Como exemplo, podemos citar a forma de alteração do estoque, que, com a utilização da extensão, garantimos ser realizada somente através de fluxos conectados ao estoque. As ações sobre o estoque são realizadas quando a função *run(endTime)* da estrutura *world* é chamada e uma série de monitorações, como retenção de fluxos que resultem em um estoque negativo.

A Figura 3.17 exhibe o gráfico resultante de uma simulação sem fluxos de entrada e retirada de água da banheira de 5 litros por minuto durante 20 minutos.

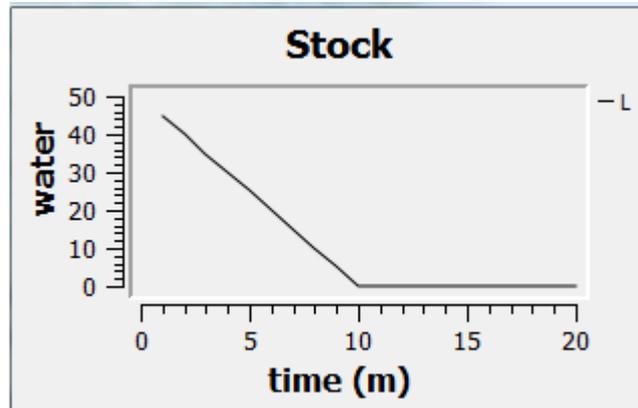


Figura 3.17 – Cenário do modelo de troca de água da banheira sem fluxo de entrada após 20 min

Com a implementação de outros modelos simplificados, como, por exemplo, o modelo simplificado de controle de temperatura de uma casa através de um termostato, conforme implementações abaixo, também podemos verificar o ganho em abstrair implementações de funções base de Dinâmica de sistemas como funções de atraso de respostas:

### **3.5.5 Implementação de um modelo simplificado de com aplicação de suavidade em respostas utilizando a extensão proposta:**

Para esta seção implementaremos o modelo simplificado de controle de temperatura de uma casa através de um termostato.

Com a implementação deste modelo, utilizamos a extensão proposta para o ambiente de modelagem TerraME e trabalhamos com funções base de Dinâmicas de Sistemas, como a função de suavidade. A Figura 3.18 demonstra o diagrama de estoque e fluxo deste modelo.

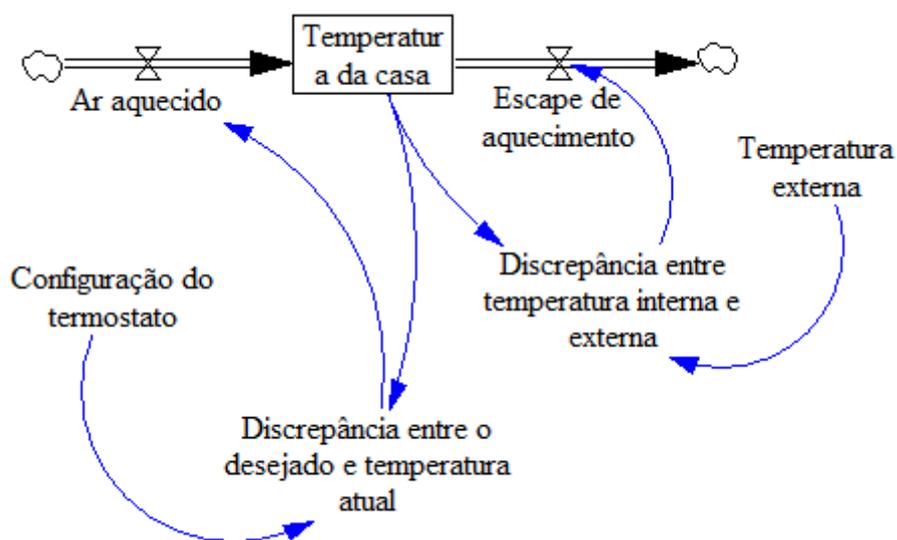


Figura 3.18 – Diagrama de Estoque e fluxo do modelo de controle de temperatura residencial através de termostato

A implementação deste modelo simplificado com a extensão proposta nos possibilita primeiramente verificar a padronização, previamente demonstrada com o modelo implementado na seção 3.5.1, e também verificar o funcionamento das funções de suavidade para simular a perda e ganho de calor. Esta suavidade nos fluxos simula, principalmente, o tempo de percepção da temperatura atual pelo termostato. Para implementar este modelo simplificado utilizando a extensão proposta, primeiramente definimos quais são os estoques a serem utilizados:

```

dofile("Stock.lua")
dofile("World.lua")
dofile("SystemDynamicsFunctions.lua")

--Initializes Stock and World
house = Stock:startStock()
w      = World:startWorld()

```

Na implementação deste modelo, definimos a variável house como o estoque. A letra “w” foi definida para representar a estrutura World para simular o modelo implementado.

Para este modelo simplificado, definimos funções auxiliares que são parâmetros a serem chamadas pelas funções de fluxo. As funções auxiliares foram implementadas dentro do padrão especificado, conforme demonstrado na implementação abaixo:

```
-- Auxiliary 1 -----  
local getInitRoomTemperature = function()  
  local roomTemp = 10  
  return roomTemp  
end  
  
-- Auxiliary 2 -----  
local getThermostatTemp = function()  
  local houseThermostat = 18  
  return houseThermostat  
end  
  
-- Auxiliary 3 -----  
local getDiscrepancy = function()  
  discrepancy = w:getAuxiliary(2) - house:getTotalValue()  
  if discrepancy > 5 then  
    discrepancy = 5  
  end  
  return discrepancy  
end
```

Para o parâmetro de temperatura externa, definimos uma quarta função auxiliar com valores de temperaturas fixos dependentes do horário do dia. As funções de fluxo foram implementadas dentro do padrão especificado, conforme demonstrado na implementação abaixo:

```

-- INFLOW 1 -----
local temperatureInflow = function()
  local heat = w:getAuxiliary(3)
  houseStock = house:getStock()
  houseHeat = houseStock + smoth1(heat, 1, 10)
end
end

-- OUTFLOW 1 -----
local temperatureLoss = function()

  houseTemp = houseTemperature:getStock()
  outflow = 0
  outflow = houseTemp + w:getAuxiliary(4)
  return outflow
end

```

A utilização da função de suavidade (*smoth()*) provê simulação de uma curva de resposta levando em consideração mudanças mais lentas no estoque durante o tempo de simulação para o termostato medir a temperatura real do ambiente.

Após definirmos o estoque e funções de fluxo, especificamos o modelo conforme demonstrado abaixo:

```

--Thermostat
-*****
--Stock: room temperature(t) = room temperature(t - dt) + (heat from furnace - heat to outside) x dt
--APPENDIX 197
--Initial stock value: room temperature = 10°C for cold room warming;
--t = hours
--dt = 1 hour
--Run time = 24 hours
--Inflow: heat from furnace = minimum of discrepancy between desired and actual room temperature or 5
--Outflow: heat to outside = discrepancy between inside and outside temperature x 10% . . . for "normal" house;
-- discrepancy between inside and outside temperature x 30% . . . for very leaky house
--Converters: thermostat setting = 18°C
--discrepancy between desired and actual room temperature = maximum of(thermostat setting - room temperature) or 0
--discrepancy between inside and outside temperature = room temperature - 24-hour outside temp . . . for full day and night cycle

--Insert Inflow
house:insertInflow(temperatureInflow)
--Inser Outflow
house:insertOutflow(temperatureLoss)
--Insert Auxiliary
w:insertAuxiliary(getInitRoomTemperature)
w:insertAuxiliary(getThermostatTemp)
w:insertAuxiliary(getDiscrepancy)
w:insertAuxiliary(externalTemp)
--Insert Stock into the World
w:insertStock(house)

w:setMapName("House Temperature")
w:setUnit("Graus C/h")

--Run the model from 1 to 24
w.start = 1
w.dt = 1
w.run(24)

```

O estoque recebe os fluxos de entrada com a função `inflow()` implementada anteriormente e fluxo de saída com a função `outflow()`.

Após a especificação de parâmetros necessários para o estoque, o inserimos no World, representado pela variável “w”, definimos o nome do modelo através da função `setMapName` e unidade através da função `setUnit`.

Para a simulação foi definido um tempo e início igual a um com um diferencial de tempo igual a um que será simulado durante 24 unidades de tempo.

### 3.5.6 Cenários gerados do modelo simplificado de com aplicação de suavidade em respostas.

A implementação do modelo simplificado descrito na seção anterior, possibilita utilizar a técnica de suavidade abstraindo sua implementação. Isto foi possível

devido à utilização da biblioteca de funções de Dinâmica de Sistemas disponibilizada pela extensão proposta.

Na implementação do modelo, estoque e fluxos seguem a padronização proposta, o que possibilita fácil identificação das partes do modelo. Outra verificação que fizemos foi a abstração das implementações de funções utilizadas na abordagem de Dinâmica de Sistemas. Como exemplo, a utilização da função de suavidade.

A Figura 3.19 exibe o gráfico resultante de uma simulação do modelo sem a utilização de suavidade no fluxo de entrada. O fluxo de entrada que não utiliza suavidade está descrito abaixo:

```
-- INFLOW 1 -----  
local temperatureInflow = function()  
  local heat = w.getAuxiliary(3)  
  houseStock = house.getStock()  
  houseHeat = houseStock + heat  
end  
end
```

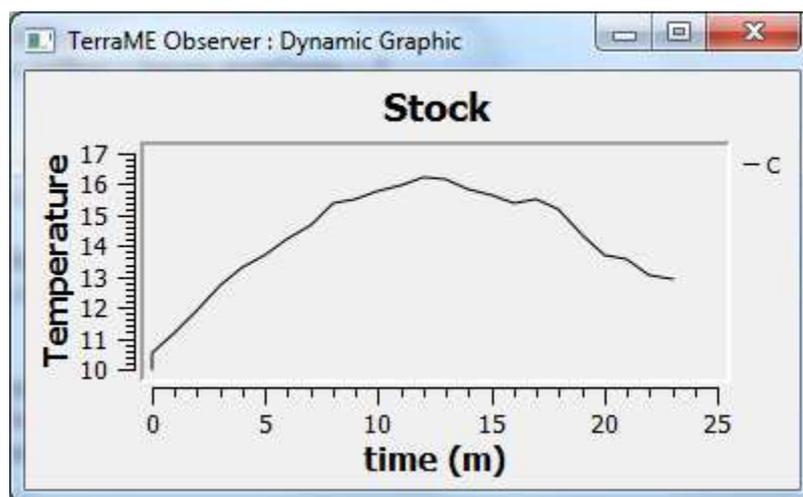


Figura 3.19 – Cenário do modelo sem utilização de suavidade

Ao utilizarmos a chamada da função de suavidade de primeira ordem, disponibilizada na extensão, o fluxo leva em consideração um tempo para resposta com atraso, o que resulta na mudança menos brusca do estoque.

Para demonstrarmos a utilização da função de suavidade de primeira ordem, modificamos o fluxo de entrada, conforme descrito abaixo:

```
-- INFLOW 1 -----  
local temperatureInflow = function()  
  local heat = w:getAuxiliary(3)  
  houseStock = house:getStock()  
  houseHeat = houseStock + smoth1(heat, 1, 10)  
end  
end
```

Na função acima, a função `smoth1`, representa a função de suavidade de primeira ordem. A variável `heat`, é o valor do fluxo para o estoque em um determinado momento da simulação, A segunda variável é a intensidade de suavização de primeira ordem, para este exemplo será simulado com intensidade 1, e, a terceira variável é o valor inicial do estoque, 10 Graus Celsius. A Figura 3.20 exibe o gráfico resultante de uma simulação do modelo com a utilização da suavidade descrita acima no fluxo de entrada.

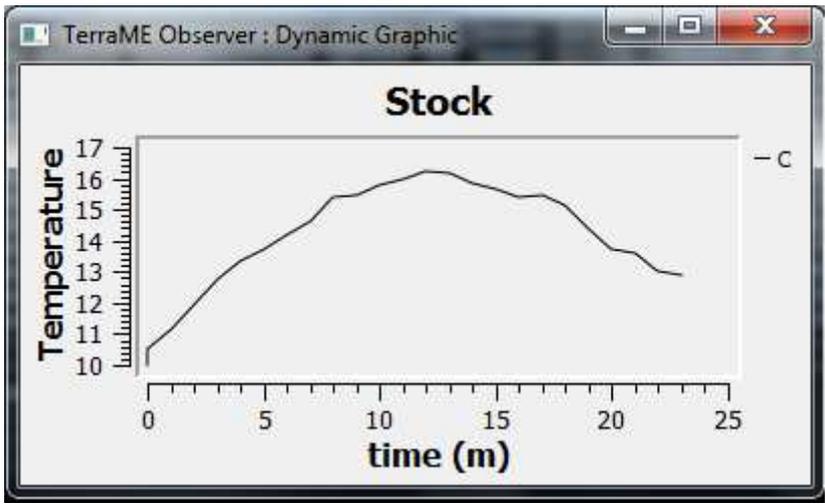


Figura 3.20 – Cenário do modelo com utilização de suavidade de primeira ordem com intensidade 1.

A aplicação da suavidade fica mais nítida conforme aumentamos a intensidade. Ao mudarmos a suavidade do fluxo de entrada para intensidade 5, conforme descrito abaixo, notamos com o gráfico resultante, Figura 3.21, a aplicação de um fluxo com maior suavidade.

```
-- INFLOW 1 -----  
local temperatureInflow = function()  
  local heat = w:getAuxiliary(3)  
  houseStock = house:getStock()  
  houseHeat = houseStock + smoth1(heat, 5, 10)  
end  
end
```

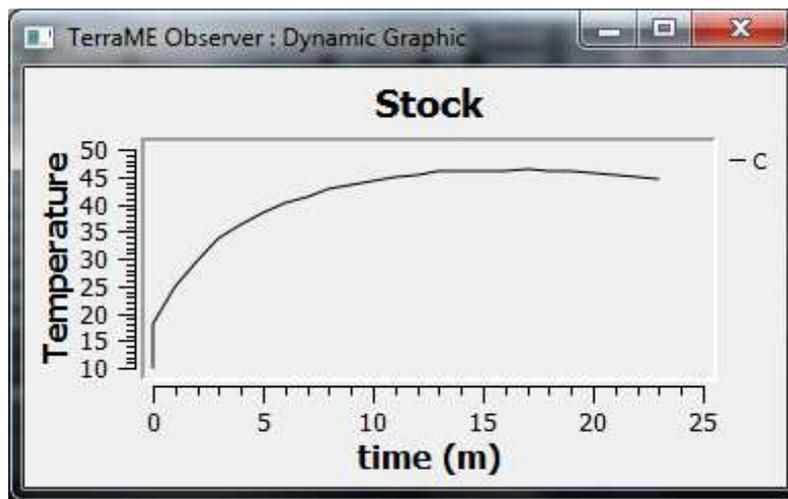


Figura 3.21 – Cenário do modelo com utilização de suavidade de primeira ordem com intensidade 5.

Da mesma forma que disponibilizamos a função de suavidade com a extensão proposta, nós também disponibilizamos outras funções da abordagem de Dinâmica de Sistemas.

Neste mesmo modelo utilizamos também a função de atraso do fluxo por 3 horas. A função de atraso tem um comportamento diferente, pois simula a oscilação da temperatura medida com a temperatura real. A Figura 3.22 apresenta como seria o cenário deste modelo, se ao invés de utilizarmos a função de suavidade, utilizássemos a função de atraso de 3 horas.

```
-- INFLOW 1 -----  
local temperatureInflow = function()  
  local heat = w:getAuxiliary(3)  
  houseStock = house:getStock()  
  houseHeat = houseStock + delay1(heat, 3, 1)  
end  
end
```

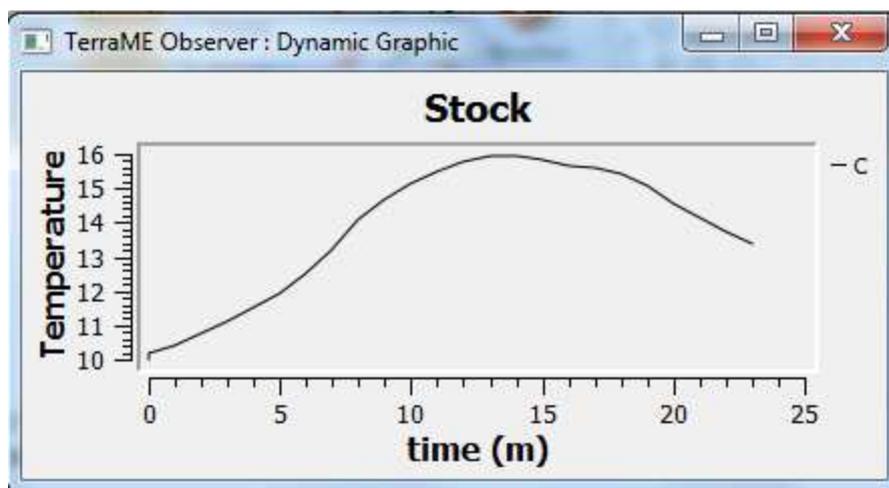


Figura 3.22 – Cenário do modelo com utilização de atraso de primeira ordem com 3 horas de atraso.

## **4 MODELOS PARA VALIDAÇÃO DA EXTENSÃO PROPOSTA PARA MODELAGEM ESPACIAL DE DINÂMICA DE SISTEMAS NO TERRAME**

O monitoramento e o conhecimento de suas distribuições no espaço geográfico de modelos ambientais são de extrema importância para o planejamento estratégico. Para testar e explorar as soluções propostas neste trabalho, apresentamos neste capítulo implementações de modelos, adaptados para utilização de Dinâmica de Sistemas Espaciais. Na seção 4.1 apresentamos um modelo simplificado, adaptado de Andrews Ford (1999) com o objetivo de comparar modelos ambientais implementados com a padronização proposta. O modelo de Andrews Ford foi utilizado para analisar o fluxo de água no Mono Basin, California. A seção 4.2 apresenta um modelo simplificado de produção de milho, elaborado para verificar as vantagens de trabalhar com modelos que possuem mais de um estoque com valores distribuídos em células de um determinado espaço celular.

O objetivo principal deste capítulo não está na validação dos modelos, mas sim na avaliação das estruturas da extensão proposta, utilizadas com funções base de Dinâmica de Sistemas. Porém, para isso, tivemos que fazer um estudo dos modelos para poder implementá-los com a extensão proposta.

### **4.1 Modelo simplificado de fluxo de água no *Mono Basin***

O *Mono Basin* é uma bacia de drenagem localizada a leste do Parque Nacional de Yosemite, na Califórnia e Nevada. Sua área é limitada a oeste pela Sierra Nevada, ao leste pelas Montanhas Cowtrack, ao norte pelo Bodie Hills, e ao sul pelo lado norte da Caldeira Long Valley, como demonstrado na Figura 4.1. O *Mono Basin* contém o lago *Mono Lake*, um dos mais antigos e ainda existentes no mundo, ele foi o fator principal da guerra pela água na Califórnia em 1979. É a área mais geologicamente e historicamente reconhecida nos Estados Unidos da América devido à história vulcânica da Bacia, bem como vários históricos humanos. O Mono Lake foi selecionado como primeira experiência de implementação de modelos espaciais no TerraME com a extensão proposta devido a importantes regras que regem este modelo, bem como a importância

da espacialização dos dados para visualização de impactos na área do lago na demonstração de cenários. Nesta seção apresentamos o modelo simplificado de fluxo de água do Mono Lake implementado com utilização de estruturas e funções da extensão proposta.

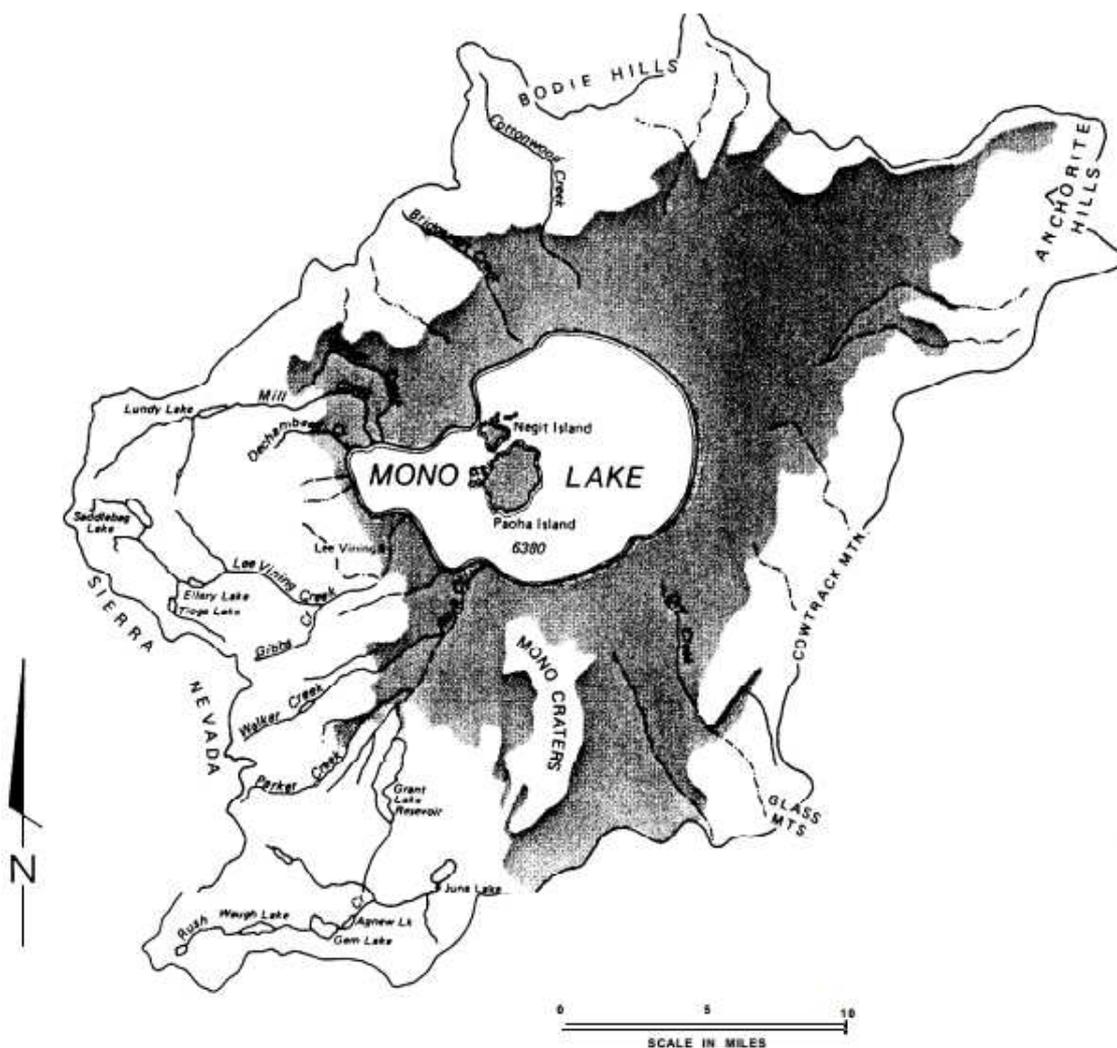


Figura 4.1 – Mono Lake  
Fonte: Vorster (1985)

Em 1900, a cidade de Los Angeles suportava uma população de 100.000 habitantes. Nesta época, o vale Owens foi considerado como potencial fonte de água para abastecimento da cidade. Sob a liderança de William Mulholland, a cidade completou o aqueduto no vale Owens em 1913. Em 1930 a população da cidade alcançou 1 milhão de habitantes e novas fontes de água foram necessárias. Em 1941 o aqueduto para o rio Colorado foi completado e

no mesmo ano, o aqueduto Los Angeles foi estendido para atingir o Mono Basin.

O aqueduto começou a conduzir água do Mono Basin para a cidade em 1941. O fluxo de água do lago para a cidade é realizado através de tuneis localizados na base do lago das crateras do Mono que atinge o nordeste do rio Owens. O trajeto até Los Angeles é de cerca de 644 quilômetros e a água flui devido à gravidade e sifões, produzindo energia hidroelétrica no caminho. Em 1970 o desvio de água era em média 100 KAF/ano (milhar de acre por ano).



Figura 4.2 – Histórico de elevação do *Mono Lake*

Os impactos devido ao desvio de água foram marcantes conforme mostrado na Figura 4.2. Em 1941 a superfície do lago estava 1.956 metros acima do nível do mar e continha 5.303.971.912 m<sup>3</sup> de água com superfície de 222.577,85 m<sup>2</sup>. A salinidade era de 55g/L (gramas por litro), fator crucial para espécies como camarão. Em 1981 o volume do lago diminuiu aproximadamente para a metade e sua salinidade subiu para 100 g/L, a uma altura de 1942,2 metros de altura acima do nível do mar, com uma baixa de 13,71 metros desde o início de desvio de água (FORD, 1999).

Um grupo de estudantes de Sistemas Terrestres começou a estudar o comportamento do desvio do lago em 1970. Em 1978 foi formado o comitê de proteção do Mono Lake. Após alguns processos, a suprema corte de Califórnia respondeu em 1983 reconsiderando o direito de desvio de água do lago para abastecimento da cidade. O lago foi reconhecido como tesouro de importância nacional e iniciaram-se estudos para um consumo equilibrado de água do lago sem comprometer o ambiente. Em 1994 foi concluído que para um balanço apropriado de consumo de água do lago, deveria existir um limite para o fluxo de saída em função do fluxo de entrada de água, possibilitando que o nível do lago aumente até um limite de 1948 metros. Após atingir esse nível o fluxo de saída de água pode igualar ao fluxo de entrada, atingindo um estado de balanço. Existem vários estudos sobre o Mono Lake quanto ao balanço de água, políticas públicas, ecossistema e outros presentes na literatura (FORD, 1999; VORSTER, 1985; BISCHOFF et al. 1993; LOOMIS, 1987; MACINTYRE, 1999; ORELAND et al. 2002). A Figura 4.3 mostra os fluxos de água existentes no Mono Lake (FORD, 1999).

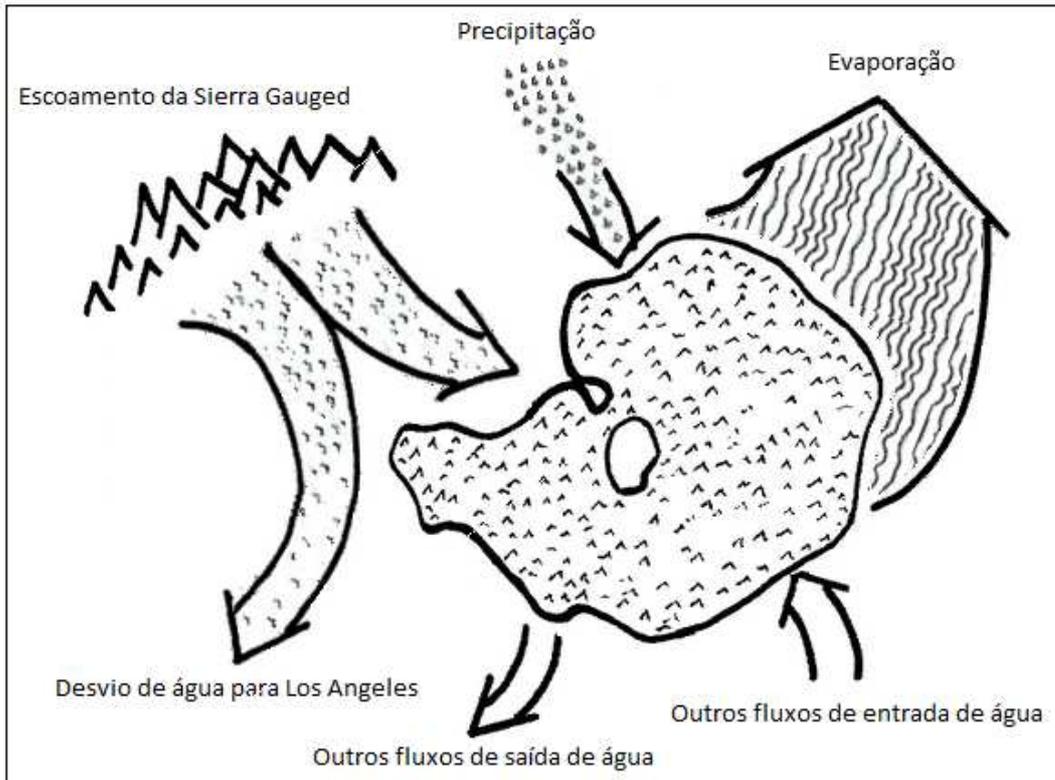


Figura 4.3 – Fluxos de água do *Mono Lake*

Fonte: Adaptado de Ford (1999).

O modelo de fluxo de água do Mono Lake disponibilizado por Andrew Ford, 1999 foi implementado utilizando a extensão proposta neste trabalho. A principal variável manipulada no modelo para análise de variação do volume de água foi a quantidade de água desviada do escoamento medido da Sierra. O estoque de água foi medido em KAF (quilo Acre-pés). O valor inicial do estoque é de 2.228 KAF para representar a quantidade de água presente no lago em 1990 e o diferencial de tempo (dt) foi de 1 ano. Para manter as unidades consistentes, a área do lago foi medida em milhares de acres e a taxa de precipitação foi medida em pés por ano. A Figura 4.4 ilustra o diagrama de estoque e fluxos para o modelo implementado.

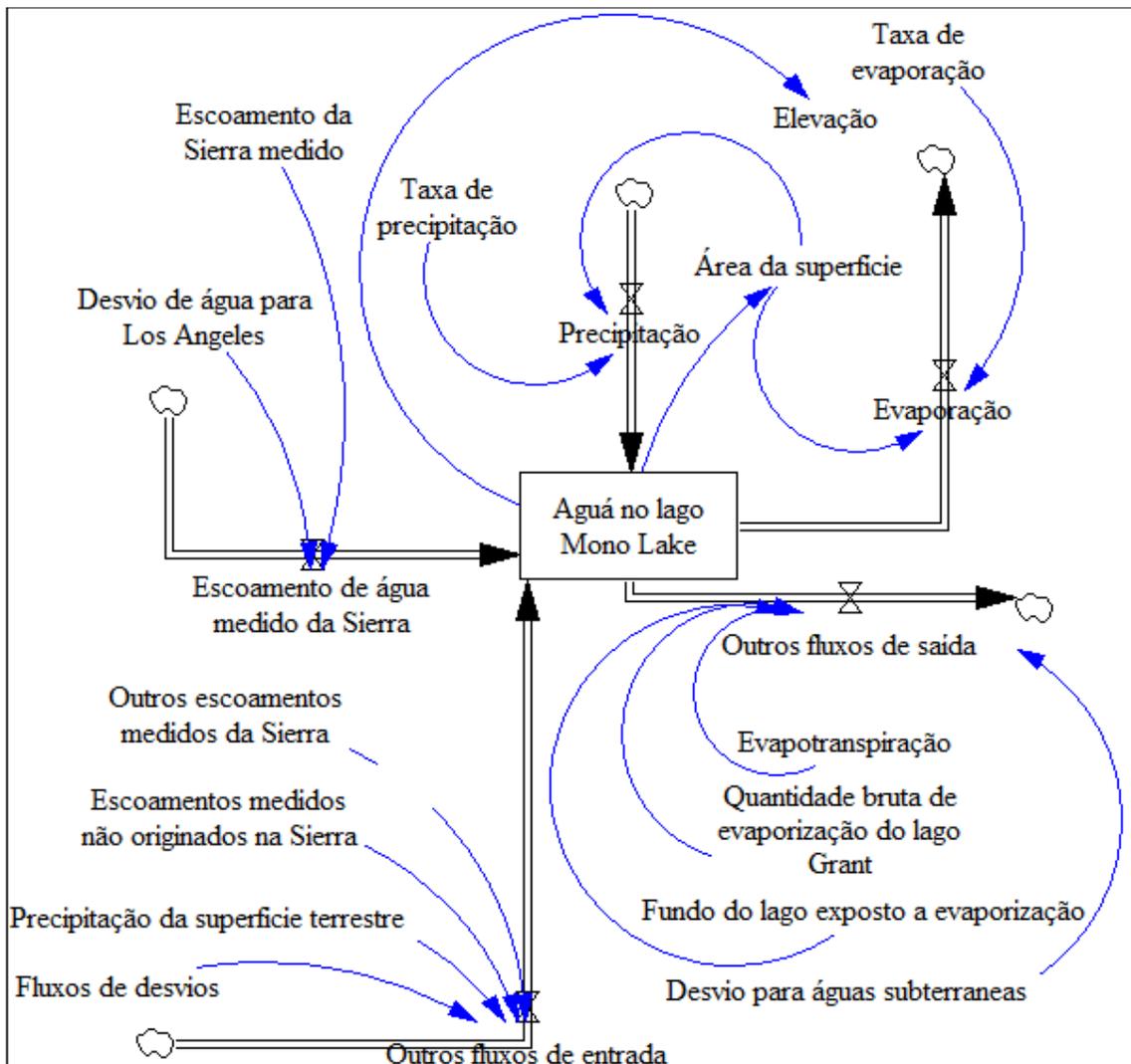


Figura 4.4 – Diagrama de Estoque e Fluxos do modelo de fluxo de água do *Mono Lake*  
 Fonte: Adaptado de Ford (1999).

O fluxo de entrada de água que chega no Mono Lake originado devido ao escoamento medido da Sierra é a subtração do total do escoamento pelo desvio de água retirado para a cidade de Los Angeles. O modelo também inclui fluxos de entrada devido à precipitação e fluxos de saída devido à evaporação. A evaporação é a área da superfície multiplicada pela taxa de evaporação e a precipitação é a área da superfície multiplicada pela taxa de precipitação. A área da superfície varia de acordo com a variação do volume de água do lago. A área da superfície do lago relacionada ao seu volume de água foi dada baseada na pesquisa de Vorster (1985, 261) e sumarizada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Área da superfície do lago Mono Lake em função do volume de água

<b>Volume de água no lago (KAF)</b>	<b>Área da superfície (Kacres)</b>	<b>Elevação (pés acima do nível do mar)</b>
0	0	6.224
1.000	24,7	6.335
2.000	35,3	6.369
3.000	48,6	6.392
4.000	54,3	6.412
5.000	57,2	6.430
6.000	61,6	6.447
7.000	66	6.463
8.000	69,8	6.477

Fonte: Vorster (1985, 261), adaptada de Ford(1999)

A taxa de evaporação foi assumida com o valor 3.75 pés/ano e a taxa de precipitação com o valor 0.67 pés/ano considerando uma média anual local. Para iniciar a simulação com os dados de 1990. Os demais valores utilizados no modelo foram adquiridos da pesquisa de Vorster (1985):

- Quantidade bruta de evaporação do lago Grant, um pequeno composto do Mono Lake, é de 1,3 KAF/ano.
- Evapotranspiração de terra irrigada, vegetação ciliar e outras vegetações são de 13 KAF/ano.
- Fundo do lago exposto à evaporação foi estimado em 12 KAF/ano.
- Desvio para águas subterrâneas foi estimado em 7,3 KAF/ano.
- Outros escoamentos da Sierra medidos como escoamentos pequenos e intermitentes, estimado de 17 KAF/ano.
- Escoamentos medidos não originados na Sierra, como os escoamentos originados no norte, leste e sul, foram estimados em 20 KAF/ano.

- A precipitação que não ocorre diretamente na superfície do lago, mas cai no solo e atinge o lago foi estimada de 9 KAF/ano.
- Outros pequenos desvios para abastecimento de pequenos municípios foram estimados em 1.6 KAF/ano.

Este modelo implementado com a extensão para modelagem de Dinâmica de Sistemas Espaciais tem o objetivo de avaliar informações oferecidas sobre o estoque no tempo e espaço. A implementação do modelo Mono Lake se deu em duas etapas. Na primeira etapa, foram identificadas as adaptações necessárias para que o modelo fosse implementado com o valor quantitativo do estoque de água dividido entre as células de um espaço celular de cinquenta linhas por cinquenta colunas, cujo valor de água em cada célula varia de acordo com as curvas de níveis do lago. A segunda etapa constituiu a implementação do modelo utilizando as funções e padronizações propostas. Parte da implementação do modelo com a extensão está descrita a seguir. As funções de fluxos de entrada e fluxos de saída se encontram no Apêndice C deste trabalho.

```

print("-----")
print("-----")
print("Monolake simulation mode..")

monolake:setName("monolake")
monolake:setUnit("water (KAF)")
--Load spatial Data loader
monolakeSpatialData = MonolakeSpatialData:startMonolakeSpatialData()
--Cellspace to load monolake Spatial Data
spatial = CellularSpace{ -- spatialStock location represented with Cellular Space
    xdim = 55,
    ydim = 55
}

--Load spatial data
spatial = monolakeSpatialData:getSpatialMonoLakeData()
-- Set stock map dimension
monolake:setXDim(55)
monolake:setYDim(55)
-- Set stock spatial data
monolake:setStock(spatial)
monolake:updateTotalStockValue()
-- Set inflows
monolake:insertInflow(inflowSierraRunOff)
monolake:insertInflow(inflowPrecipitation)
monolake:insertInflow(inflowOtherIn)
-- Set outflows
monolake:insertOutflow(outflowEvaporation)
monolake:insertOutflow(outflowOtherOut)
-- Set auxiliaries
w:insertAuxiliary(getSurfaceArea )
w:insertAuxiliary(getElevation)
w:insertAuxiliary(getEvaporationRate)
w:insertAuxiliary(getPrecipitationRate)
w:insertAuxiliary(getSierraRunoff)
w:insertAuxiliary(getExport)
w:insertAuxiliary(getNetGrantLakeEvaporation)
w:insertAuxiliary(getEvapotranspiration)
w:insertAuxiliary(getBottomEvaporation)
w:insertAuxiliary(getGroundWaterExport)
w:insertAuxiliary(getUngaugedSierra)
w:insertAuxiliary(getNonSierraRunoff)
w:insertAuxiliary(getNetLandPrecipitation)
w:insertAuxiliary(getDiversionInflow)
--Insert Stock into the World
w:insertStock(monolake)
--Load legend
w:setLegend(legend)
w:setMapName("Mono Lake")
w:setUnit("KFA")
--Set scenerio dimation
w:setXDim(55)
w:setYDim(55)
--Run the model from 2000 to 2050
w.start = 2000
w.dt = 1
w.run(2050)

```

Foram utilizadas as características do estoque espacial e um conjunto de funcionalidades de Dinâmica de Sistemas juntamente com funções nativas do ambiente de modelagem TerraMe. Na configuração inicial do modelo com desvio de 100 KFA para a cidade de Los Angeles, cada célula sofre transformações distintas, o que simula as transformações levando em consideração informações da profundidade do lago por célula.

Os cenários gerados do modelo com o lago especializado por curvas de níveis, para o volume de água no Mono Lake com desvio de água para a cidade de Los Angeles, limitado a 100KFA por ano, gerado para os anos (a) 2000, (b) 2010, (c) 2020, (d) 2030, (e) 2040 e (f) 2050, estão apresentados na Figura 4.6:

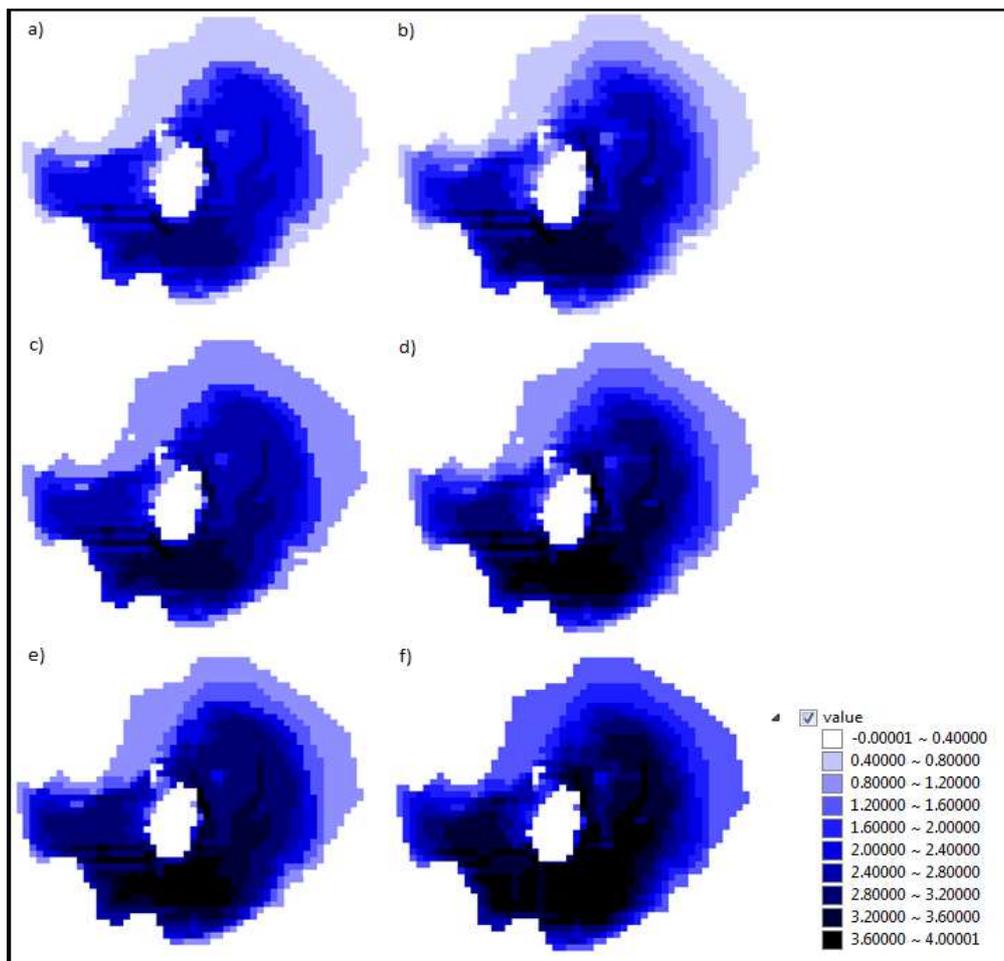


Figura 4.5 – Cenário com curvas de níveis para o volume de água no Mono Lake, gerado para os anos (a) 2000. (b) 2010, (c) 2020, (d) 2030, (e) 2040 e (f) 2050.

Os cenários oferecem suporte para observação de comportamento do lago quanto à política de desvio de água ao longo do tempo. Esta observação pode levar em consideração um conjunto de fatores referentes tanto à análise das células quanto as modificações quantitativas no volume de água.

Com a extensão que propomos neste trabalho é possível utilizar funções de fluxo que utilizam funções tradicionais de Dinâmica de Sistemas implementadas e disponibilizadas pela extensão. A visualização da mudança dinâmica da superfície do lago em função da política de desvio de água oferece suporte para percepção de impactos no lago.

Com uma comparação do código utilizando a extensão de Dinâmica de Sistemas para o TerraME com as estruturas propostas e a padronização para implementação de estoque e fluxo constamos uma implementação com código mais organizado e de mais fácil manutenção.

O modelo de desvio de água do Monolake e um modelo que simula como uma regra impacta o ambiente ao longo de um determinado tempo. O modelo a seguir simula um ciclo de evolução e produção em um tempo determinado de 182 dias levando em consideração três estoques: (i) regiões de plantio; (ii) nitrogênio presente no solo; (iii) fósforo presente no solo. O objetivo da implementação com a extensão proposta para o TerraME é validar a facilidade de conexão de estoques por fluxos, a padronização para reutilização de componentes em modelos agrícolas mais completos e visualização dos cenários com repostas das regiões que manipulam mais fertilizantes.

#### **4.2 Sistemas dinâmicos de produções agrícolas no Brasil**

Em geral, os sistemas de produção agrícola se diferem muito de acordo com a região do Brasil onde estão localizados. É necessário, em muitos casos, generalizar o modelo do sistema analisado para possibilitar análise regional. Os sistemas de produções agrícolas envolvem processos físicos, biológicos e econômicos. A integração de processos biofísicos com processos de tomada

de decisão necessita de ferramentas de modelagem que disponibilizem utilização de técnicas multidisciplinares para capturas de importantes interações, respostas e reações entre as partes do sistema com o ambiente.

Os fatores fundamentais dos agrossistemas são os fluxos de matéria e as reações espaço temporais. Um estudo de Antle e Stootvogel (2003) evidencia que a teoria neoclássica de produção tem sido desenvolvida em um arcabouço estático, com o qual, fatores temporais para tomada de decisão não são capturados de forma efetiva. O mesmo estudo também ressalta que a teoria econômica convencional de produção, geralmente, não captura, de forma efetiva, fatores espaciais. Como resultado, existe na literatura uma grande quantidade de modelos estáticos desenvolvidos.

Atualmente, existem pelo menos três tipos de abordagem para desenvolvimento de modelos agrícolas: (i) modelagem reduzida, (ii) modelagem modular, (iii) modelagem de integração biofísica com fatores econômicos (ANTLE; STOOTVOGEL, 2003).

A modelagem com a abordagem de integração biofísica e fatores econômicos depende da integração de estruturas de tomada de decisão com fatores espaciais para fornecer um modelo unificado, no qual, estados e fluxos do sistema são interconectados e operam em escala temporal e espacial compatíveis, extinguindo barreiras entre submodelos. A vantagem de disponibilizar um arcabouço para modelagem utilizando tal abordagem está na facilidade de adaptação e reutilização de modelos, o que conseqüentemente possibilita a combinação de diferentes modelos de produção.

Muitos dos modelos, relacionados à produção agrícola, utilizam uma escala temporal contínua e são tipicamente modelados com relação ao crescimento do plantio e ambiente onde estão localizados (ANTLE; STOOTVOGEL, 2003). As decisões tomadas durante o processo de produção são realizadas de acordo com os estágios de um determinado cultivo, como na preparação do solo e plantio, nas operações intermediárias de fertilização, no gerenciamento de pestes e na irrigação, cultivo e colheita.

Em vários processos de produção, as decisões podem ser tomadas em intervalos de tempos fixos. Os intervalos de plantio, a aplicação de fertilizantes e colheita nos processos de produção de grãos, como milho, feijão, arroz e trigo em uma região, podem ser predeterminados por experiências passadas de cultivos. A Figura 4.6, adaptada de Antle e Stootvogel (2003), ilustra cada submodelo que caracteriza a dinâmica dos sistemas agrícolas de forma generalizada.

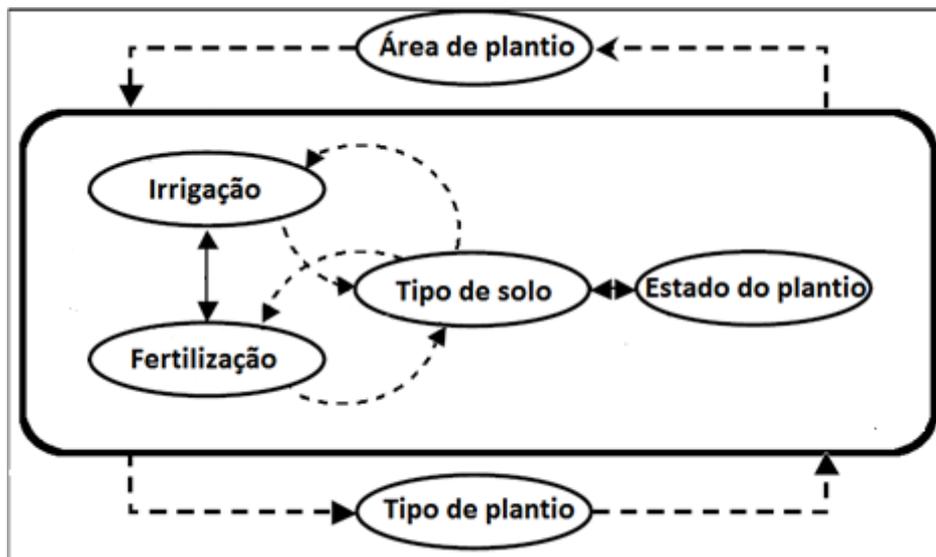


Figura 4.6 – Modelos de culturas  
 Fonte: Adaptado de Antle e Stootvogel (2003).

Em modelos mais detalhados, o processo de tomada de decisão é mais complexo, como por exemplo, em sistemas cujas decisões de gestão de pragas são relevantes (ANTLE. et al, 1994), ou em sistemas de agricultura de precisão, para os quais aplicações de fertilizantes são realizadas com relação aos nutrientes indisponíveis no solo.

Como o foco desta pesquisa é oferecer uma extensão para modelagem espacial de Dinâmica de Sistemas para o TerraME, e não na validação de modelos agrícolas, apenas usaremos os modelos de sistemas agrícolas simplificados para validação das estruturas e funções utilizadas da extensão proposta.

### **4.3 Modelos de produções agrícolas brasileiras**

Estimativas de produtividade oferecem informações de extrema importância para proprietários rurais, pois podem ser utilizadas ao longo do ciclo de desenvolvimento de culturas (HOOGENBOOM, 2000). Informações sobre a produção e a produtividade agrícola brasileira, a partir dos levantamentos das safras, são disponibilizadas pela CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento e pelo IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Os modelos de produtividade agrícola utilizam equações matemáticas, empíricas ou mecanísticas para representar o acúmulo de biomassa e o desenvolvimento das plantas. A simulação de tais modelos resulta em cenários com projeções de produtividade em função dos fatores influentes (ACOCK; ACOCK, 1991; PASSIOURA, 1996; CHEEROO-NAYAMUTH, 1999; PEDERSEN; LAUER, 2002).

Existe uma grande limitação para desenvolver modelos de produtividade de culturas, uma vez que a produtividade média real varia consideravelmente de um local para outro. Essa variação ocorre principalmente devido ao nível tecnológico empregado na produção e às condições ambientais.

Considerando a importância de culturas como milho, arroz, feijão e trigo para o agronegócio brasileiro e a necessidade de cenários com projeções de informações sobre a produção, adaptamos e testamos modelos de produção para milho e trigo utilizando o arcabouço de Dinâmica de Sistemas Espaciais. Os modelos foram definidos com base nos modelos apresentados pelo projeto WEB AGRITEC PAC disponibilizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, para o estado de São Paulo, em escala municipal.

### **4.4 Dados de produções agrícolas brasileiras**

Com base nos modelos disponibilizados pelo WEB AGRITEC PAC, os municípios foram agrupados em categorias, de acordo com a produtividade média das quatro últimas safras, para seguintes intervalos:

Milho: faixa 1, de 0 a 2000Kg/ha; faixa 2, de 2001 a 4000 kg/ha; faixa 3, de 4001 a 6000 kg/ha; faixa 4, de 6001 a 8000 kg/ha; e faixa 5, de 8001 a 10000 kg/ha;

A cultura do milho no Brasil teve importantes mudanças tecnológicas nos últimos anos, principalmente para melhoria da qualidade dos solos, o que resulta em aumentos significativos da produtividade (EMPRAPA, 2006 - Sistemas de Produção, 1 ISSN 1679-012 Versão Eletrônica - 2ª Edição). Esta melhoria na qualidade dos solos é geralmente dependente do manejo do solo visando sua fertilidade, utilizando para isso fertilizante químico entre outras práticas. Para que o objetivo do manejo racional da fertilidade do solo seja atingido, é imprescindível planejar a adubação, entre outras técnicas. Para tal planejamento, segundo dados da EMBRAPA, devem-se levar em consideração os seguintes aspectos:

1. Nutrientes presentes no solo (muitos solos têm adequado suprimento de Ca, Mg, dentre outros.);
2. Quantidades de nitrogênio (N), fósforo (F) e potássio (K) necessárias na semeadura - determinadas pela análise de solo considerando o que for removido pela cultura;
3. Fonte, quantidade e quando aplicar N (baseado na produtividade desejada);
4. Impactos devido à lixiviação de nitrogênio em solos arenosos ou à aplicação em grandes quantidades.

#### **4.5 Dados de produções de milho brasileiras**

Os dados de experimentos conduzidos pela EMBRAPA em Sete Lagoas e Janaúba no estado de Minas Gerais e relatos por Coelho e França (1995), oferecem dados da extração de nutrientes pelo milho, cultivados para produção de grãos e silagem. Uma revisão destes estudos conclui que com o aumento da produtividade, a extração de nitrogênio e fósforo aumenta, e que a maior

exigência se refere ao nitrogênio. A Tabela 4.2 contém dados da extração média de nutriente para cultura do milho destinada à produção de grãos e silagem.

Tabela 4.2 - Extração média de nutrientes pela cultura do milho destinada à produção de grãos e silagem.

Tipo de exploração	Produtividade t/ha	Nutrientes extraídos -----kg/ha -----				
		N	P	K	Ca	Mg
Grãos	3,65	77	9	83	10	10
	5,80	100	19	95	7	17
	7,87	167	33	113	27	25
	9,17	187	34	143	30	28
	10,15	217	42	157	32	33
Silagem (matéria seca)	11,60	115	15	69	35	26
	15,31	181	21	213	41	28
	17,13	230	23	271	52	31
	18,65	231	26	259	58	32

Fonte: Coelho e França (1995).

No que se refere à exportação dos nutrientes, o fósforo aplicado é quase todo absorvido e transferido para os grãos (77 a 86 %), seguindo-se o nitrogênio (70 a 77 %), o enxofre (60 %), o magnésio (47 a 69 %), o potássio (26 a 43 %) e o cálcio (3 a 7 %) (EMBRAPA, 2006).

O milho é uma cultura que remove grandes quantidades de nitrogênio e, usualmente, para produtividades elevadas é requerido o uso de adubação nitrogenada durante o plantio para complementar a quantidade suprida pelo solo (EMBRAPA, 2006). As seções seguintes apresentam a relação de fertilizantes com nitrogênio e fosforo nas produções de milho brasileiras, como também as áreas produtivas.

#### **4.6 Relação entre fertilizantes com nitrogênio nas produções de milho brasileiras**

A quantidade de N a aplicar é o fator mais importante durante a decisão do manejo de fertilizantes devido a motivos econômicos e ambientais. As atuais recomendações da EMBRAPA para adubação nitrogenada em cobertura

baseiam em curvas de respostas, histórico de área e produtividade esperada. Estas recomendações são de 40 a 80 kg de N/ha para cultura do milho de sequeiro. Para agricultura irrigada, que oferece condições para elevadas produtividades, as recomendações são de 100 a 150 kg/ha. De forma geral, os dados de quantidade de N para cultivo do milho estão descritos na Tabela 4.2.

De modo simplificado, com base em dados disponibilizados pela EMBRAPA e Coelho et al. (1992), pode-se considerar a seguinte equação que resulta em estimativa da quantidade de N necessária para o plantio:

$$N_f = (N_y - N_s)/E_f$$

Sendo:

$N_f$  = quantidade de nitrogênio requerida pela planta;

$N_y$  = quantidade de nitrogênio que pode ser acumulada na matéria seca da parte da área da planta (Palha e Grãos). Estes valores variam de 1% na Palha a 1,4% de N nos grãos, em média (EMBRAPA; FAO, 2013).

$N_s$  = quantidade de nitrogênio suprido pelo solo (Dados da EMBRAPA indicam 20 kg de N para cada 1 % de matéria orgânica do solo);

$E_f$  = fator de eficiência ou aproveitamento do fertilizante pela planta, o qual é calculado em função do aumento do conteúdo de nitrogênio da parte aérea por unidade de fertilizante aplicado. Estes Valores variam de 0,5 a 0,7 (EMBRAPA, 2013).

#### **4.7 Relação entre fertilizantes com fósforo nas produções de milho brasileiras**

Para o cultivo de milho, a quantidade de fósforo necessária é bem menor em relação à do nitrogênio (Tabela 4.2), porém, as doses normalmente recomendadas são altas devido ao baixo aproveitamento deste nutriente pela cultura (em média, o aproveitamento é de 20 a 30% segundo dados da EMBRAPA). Isto decorre devido ao ciclo dinâmico do fósforo, o que envolve a

alta capacidade de fixação do fósforo adicionado ao solo, através de mecanismos de adsorção e precipitação, o que resulta na redução de sua disponibilidade para as plantas (EMBRAPA, 2006).

Para discriminar potenciais de respostas do milho à adubação fosfatada, é necessária uma análise de solo. As recomendações da EMBRAPA quanto à adubação fosfatada no cultivo do milho para produção de grãos, com base no rendimento esperado, são apresentadas nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 - Interpretação das classes de disponibilidade de fósforo no solo, de acordo com o teor de argila e disponibilidades de potássio.

Características  Argila (%)	Classes de P disponível no solo <sup>1/</sup> ----- (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>2/</sup> -----		
	P disponível <sup>3/</sup>		
	Baixo	Médio	Adequado
60-100	< = 5,5	5,5 - 8,0	> 8,0
35-60	< = 8,1	8,1 - 12,0	> 12,0
15-35	< = 12,1	12,1 - 20,0	> 20,0
0-15	< = 20,1	20,1 - 30,0	> 30,0
	Classes de K disponível no solo <sup>1/</sup>		
	Baixo	Médio	Adequado
	< = 41	41 - 70	> 70

<sup>1/</sup> Método Mehlich - 1, <sup>2/</sup> mg dm<sup>-3</sup> = ppm (m/v), <sup>3/</sup> Nesta classe, apresentam-se os níveis de acordo com o teor de argila. O limite superior desta classe indica o nível crítico.

Fonte: EMBRAPA (2006), adaptado de Alvarez et al. (1999)

Tabela 4.4 - Recomendação de adubação para milho grãos com base na análise de solo e na produtividade esperada.

(t/ha)	-----kg/ha-----							
Produtividade	Dose de N Plantio			Disp. de P			Disp. de K	Doses de N Cobertura
	Baixa	Média	Adequada	Baixa	Média	Adequada	Baixa	
	de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -			de K <sub>2</sub> O-				
4 – 6	10 - 20	80	60	30	50	40	20	60
6 – 8	10 - 20	100	80	50	70	60	40	100
>8	10 - 20	120	100	100	90	80	60	140

Fonte: Alves et al. (1999)

#### 4.8 Cálculos de balanço hídrico

Os cálculos de balanço hídrico usam a base de dados diários de temperatura máxima e mínima do ar e chuva, provenientes de 1.053 estações meteorológicas espalhadas por todo território brasileiro, pertencentes a diversas instituições governamentais ou privadas, em acordo com o Sistema de Monitoramento Agro meteorológico (Agritempo), que disponibiliza os dados meteorológicos diariamente (EMBRAPA, 2006). A evapotranspiração real da cultura (ET<sub>r</sub>) foi determinada pela EMBRAPA através do balanço hídrico sequencial, baseada no método de Thornthwaite e Mather (1955). Devido dificuldade de se inferir precisamente a capacidade de água disponível (CAD) para cada município brasileiro, a EMBRAPA utiliza um valor médio (CAD fixo) de 50 mm, 30 mm, 35 mm e 40 mm para o cultivo de milho em solos de textura média nas notas técnicas do Zoneamento Agrícola.

#### 4.9 Equações de produção para o cultivo de milho

O coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>) e o coeficiente de resposta a deficiência hídrica (K<sub>y</sub>), foram obtidos a partir de estudos realizados pela EMBRAPA sobre diversas condições e históricos de cultivo. A EMBRAPA também leva em consideração valores médios obtidos na literatura normalmente utilizados como referências para K<sub>c</sub> e K<sub>y</sub>. Foi ajustado um modelo para cálculos utilizando esses coeficientes, que foram organizados por fases fenológicas, em escala diária. A equação 4.1 foi utilizada para o cálculo do kc diário:

$$K_c = K_{c \max} * EXP \left\{ -0,5 * \left[ \frac{\left( \left| \frac{DAE}{10} - DAEx \right| \right)^a}{b} \right] \right\} \quad 4.1$$

Onde K<sub>cmax</sub> é o valor máximo do K<sub>c</sub> atingido pela cultura, DAE corresponde a dias após a emergência, DAEx corresponde ao dia em que K<sub>cmax</sub> ocorre, a e b são parâmetros da equação, respectivamente 2,2 e 6,0.

A equação 4.2, fornecida pela EMBRAPA, foi utilizada para o cálculo do  $K_y$  diário, onde  $K_{y\max}$  é o valor máximo do  $K_y$  apresentado pela cultura,  $DAE$  corresponde a dias após a emergência,  $DAEx$  corresponde ao dia em que  $K_{y\max}$  ocorre,  $a$  e  $b$  são parâmetros da equação, respectivamente 2,3 e 2,0.

$$K_y = K_{y\max} * EXP \left\{ -0,5 * \left[ \frac{\left( \left| \frac{DAE}{10} - DAEx \right| \right)^a}{b} \right] \right\} \quad 4.2$$

Para a estimativa de produtividade potencial ( $P_p$ ) foi empregado o Método da produtividade potencial tecnológica, desenvolvido e disponibilizado pela EMBRAPA, que surgiu através de estudos de métodos de estimativas de produtividade potencial empregadas no “Método da Zona Agroecológica” (Modelo FAO) e no Método da produtividade máxima observada. A produtividade real ( $P_r$ ) é estimada a partir da deficiência hídrica relativa ( $1 - (E_{Tr}/E_{Tc})$ ), ponderada por um fator de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico ( $K_y$ ), conforme Doorenbos e Kassam (1979):

$$- \quad P_r/P_p = 1 - K_y[1 - (E_{Tr}/E_{Tc} K_c)]$$

#### 4.10 Localização geográfica dos cultivos de milho no Brasil

A região Sul do Brasil é atualmente a maior produtora de milho com 34,8 % de produção sendo 24,9 toneladas de milho produzidas em 2008. A Tabela 4.5 oferece dados dos principais estados produtores de milho no Brasil para o ano de 2008.

Tabela 4.5 - Principais estados produtores de milho no Brasil em 2008.

Estado	Produção (%)	Produção (milhões .de toneladas)	Produtividade (Kg/ha)
Paraná	20,3	15,6	5335
Mato Grosso	12,7	7,8	4261
Minas Gerais	9,1	6,6	5007
Rio Grande do Sul	9,5	5,2	3811
São Paulo	6,7	4,7	4846
Goiás	6,3	5,1	5633
Santa Catarina	5,0	4,1	5713
Mato Grosso do Sul	6,7	3,7	3799
Bahia	5,0	1,9	2599

Fonte: EMBRAPA (2008)

Demonstração de dados sobre a espacialização de cultivo de milho no Brasil, representados por faixas Kg/ha, podem ser vistos na Figura 4.7.

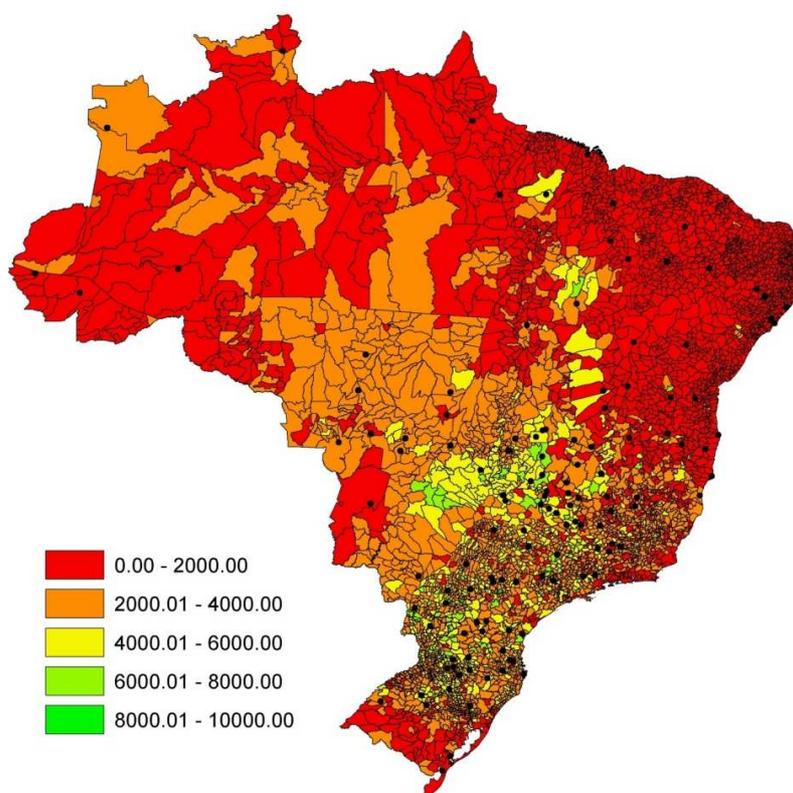


Figura 4.7 - Mapa de produtividade de milho representado por faixas em Kg/ha.

Fonte: EMBRAPA (2008)

#### **4.11 Implementação do modelo de produção de milho para o estado de Minas Gerais, Brasil.**

A partir dos estudos sobre a produção de milho no Brasil e identificação dos principais processos que envolvem a dinâmica de N e F, nós adaptamos e simplificamos o modelo de produção de milho disponibilizado pela Embrapa, organizando as equações e mapeando processos para construção do diagrama de estoque e fluxo mostrado na Figura 4.8. O modelo foi implementado com a extensão proposta neste trabalho.

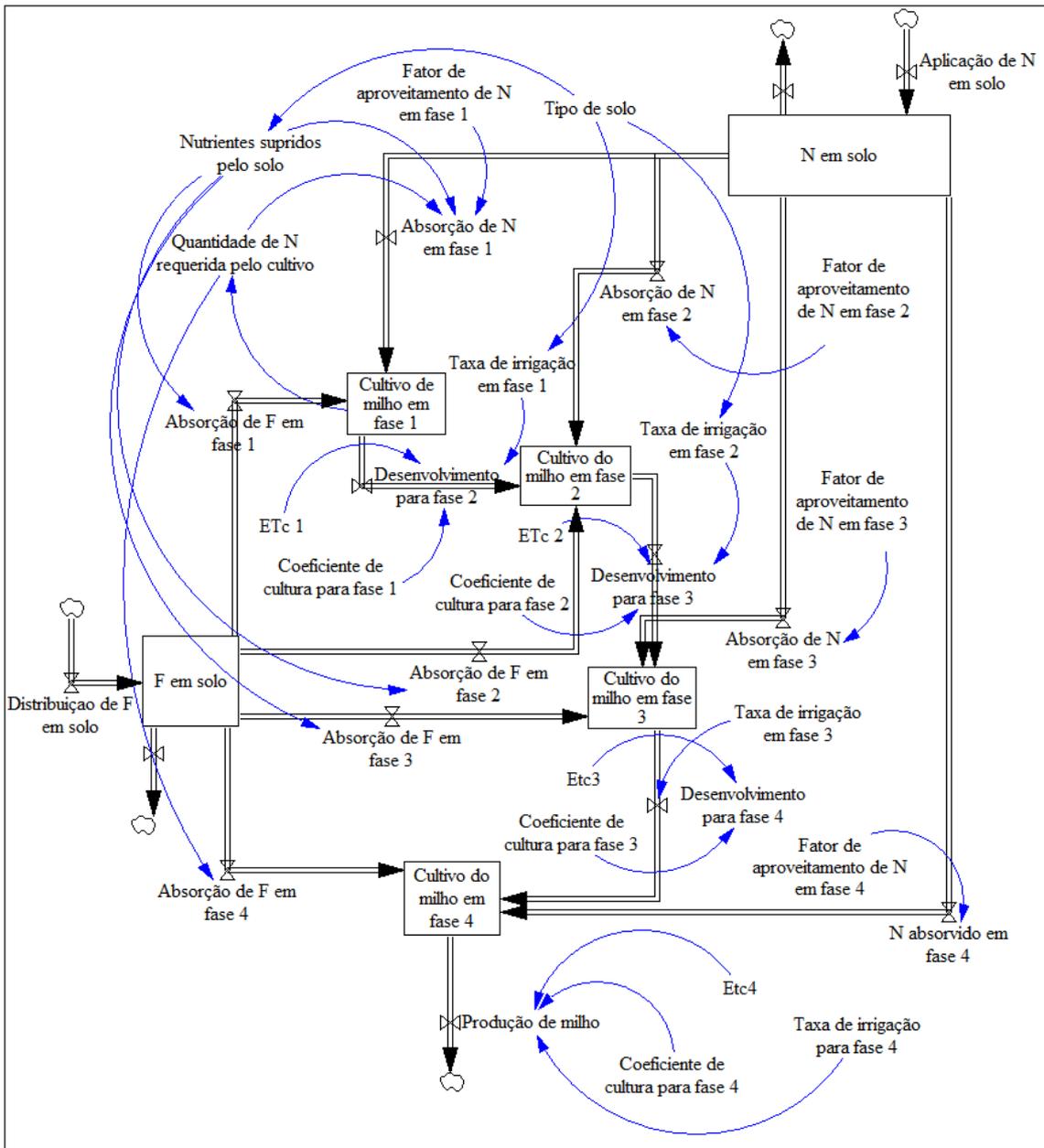


Figura 4.8 - Diagrama de estoque e fluxo do modelo simplificado de cultivo do milho

Para os sistemas agrícolas, estes estudos oferecem suporte também para melhor entendimento sobre perdas de fertilidade do solo em um local, danos causados por erosões, processos de sedimentação e análise de sustentabilidade dos sistemas. A modelagem de alguns sistemas necessita inclusive da análise de subcampo devido a formações de piscinas de substâncias e resíduos gerados por esses sistemas (ANTLE; STOOTVOGEL, 2003). A estrutura utilizada na implementação do está descrita abaixo.

```

print("-----")
print("-----")
print("Corn production model..")

--Cellspace to load N applied Spatial Data
spatial_N = CellularSpace{
    xdim = 52,
    ydim = 52
}
--Cellspace to load P applied Spatial Data
spatial_P = CellularSpace{
    xdim = 52,
    ydim = 52
}
--Corn Production
spatial_corn_production = CellularSpace{
    xdim = 52,
    ydim = 52
}
-----
--Load spatial data
spatial_corn_production = spatialCornProductionData:getSpatialCornProductionData()
spatial_P = spatial_P_Data:getSpatialCornProductionData()
spatial_N = spatial_N_Data:getSpatialCornProductionData()
-----
N_in_soil:setName("N_in_soil")
N_in_soil:setUnit("Kg/ha")
P_in_soil:setName("P_in_soil")
P_in_soil:setUnit("Kg/ha")
culti_production:setName("Corn Production")
culti_production:setUnit("Kg/ha")
-- Set stock map dimension
N_in_soil:setXDim(52)
N_in_soil:setYDim(52)
P_in_soil:setXDim(52)
P_in_soil:setYDim(52)
culti_production:setXDim(52)
culti_production:setYDim(52)
-- Set stock spatial data
N_in_soil:setStock(spatial_N)
P_in_soil:setStock(spatial_P)
culti_production:setStock(spatial_corn_production)
N_in_soil:updateTotalStockValue()
P_in_soil:updateTotalStockValue()
culti_production:updateTotalStockValue()
-- Set inflows
N_in_soil:insertInflow(nitrogenFertilization)
P_in_soil:insertInflow(phosphorousFertilization)
culti_production:insertInflow(cornProduction)
-- Set scenarios
N_in_soil:setShowSpatialStock(false)
P_in_soil:setShowSpatialStock(false)
culti_production:setShowSpatialStock(true)
--Insert Stock into the World
w:insertStock(N_in_soil)
w:insertStock(P_in_soil)
w:insertStock(culti_production)
--Load legend
w:setLegend(legend)
w:setMapName("Corn Production")
w:setUnit("Kg/ha")
--Set scenerio dimention
w:setXDim(52)
w:setYDim(52)
--Run the model
w.start = 1
w.dt = 1
w:run(182)

```

Os cenários gerados do modelo de produção de milho espacializado por célula, que simula o período de 182 dias para a última colheita com aplicações de diferentes quantidades de fertilizantes nitrogenados e fertilizantes com Fósforo são mostrados, na Figura 4.9 com (a) 10 dias, (b) 15 dias, (c) 20 dias, (d) 30dias, (e) 35 dias e (f) 40 dias após a emergência – DAE:

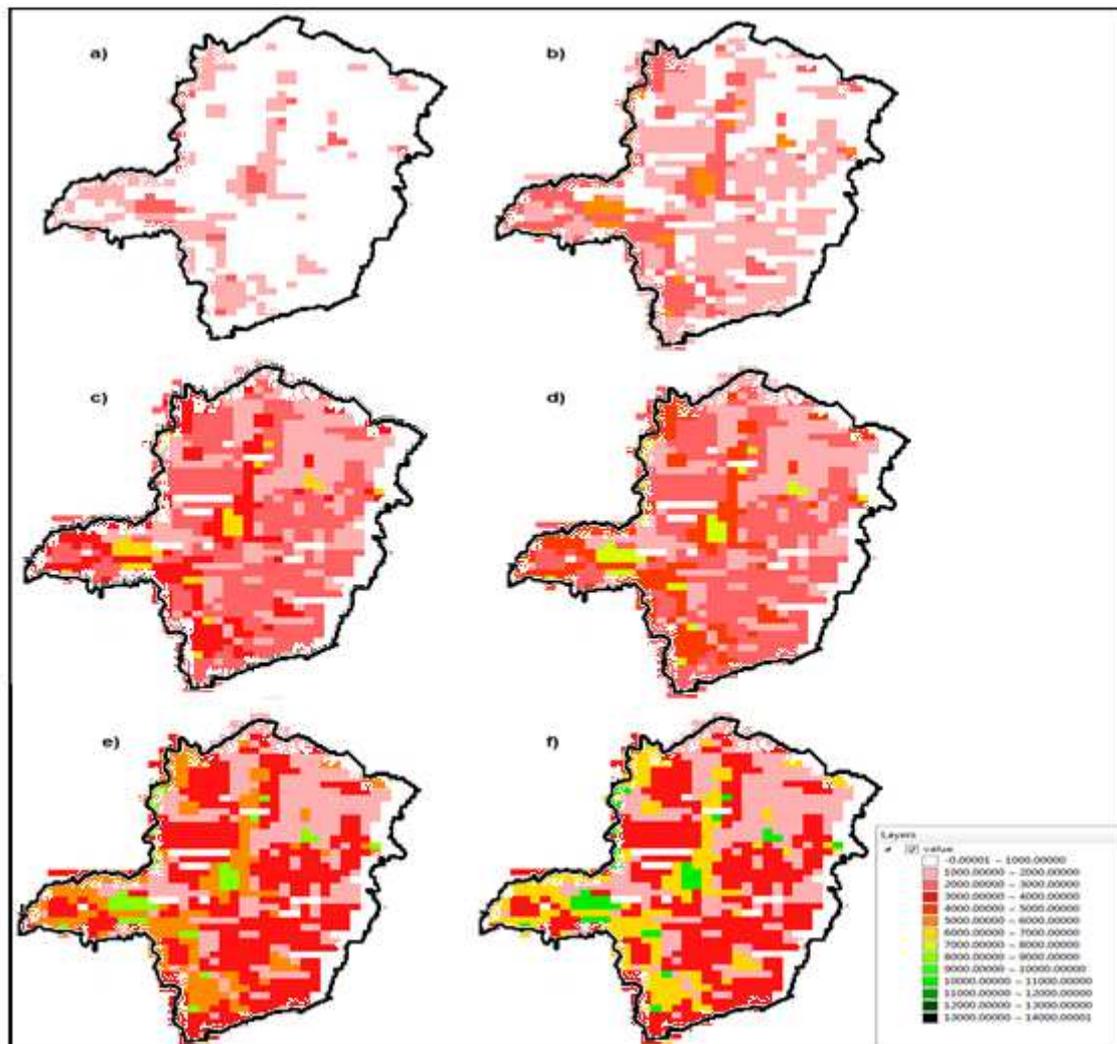


Figura 4.9 – Cenário com (a) 10 dias, (b) 15 dias, (c) 20 dias, (d) 30dias, (e) 35 dias e (f) 40 DAE utilizando diferentes quantidades de fertilizantes.

Os cenários gerados oferecem suporte para observação de resposta do cultivo quanto à quantidade de nitrogênio e fósforo aplicada. A colheita é realizada de forma dinâmica com início após 145 dias do plantio. Esta observação pode levar em consideração um conjunto de fatores referentes

tanto à análise de aplicação de fertilizantes e efeitos no ambiente quanto ao uso e modificação do solo.

O uso de técnicas como realimentação da informação e atraso em respostas que afetam sistemas espaciais auxilia descrever e visualizar eventos não lineares.

A padronização para descrever os estoques e fluxos utilizando a extensão provê reutilização dos mesmos como subsistemas de sistemas mais complexos para entender como as partes de um sistema estão relacionadas e como a troca de informação flui no tempo.

Tomadores de decisão precisam saber o porquê e como os sistemas humanos afetam o ambiente para que possam elaborar regras e políticas que são sustentáveis. Os modelos tem um papel crucial para entender como a realimentação afeta sistemas e o ambiente que os suporta. A formulação de boas regras que regem os sistemas humanos depende do foco de estudos para entender acontecimentos no passado e influências das regras do sistema para futuros cenários.

Considerando-se o tamanho e a complexidade dos sistemas que afetam o ambiente, o uso de funções de Dinâmica de Sistemas disponibilizadas oferece um modo para utilização de tais funções para modelagem abstraído detalhes da implementação, de forma a disponibilizar para os tomadores de decisão de setores públicos resultados que exploram as ferramentas qualitativas do TerraME, como gráficos de comportamento do sistema espacial no tempo para estudo de resultados desejados.

Este trabalho foi desenvolvido também com a finalidade de explorar as ferramentas de visão de estoques no espaço, que oferecem informações para analisar os problemas de forma dinâmica.

As padronizações das estruturas de estoque especializado e mundo para simulação do sistema como um todo mais o conjunto de funções base de

Dinâmica de Sistemas disponibilizadas na extensão proposta respondem a primeira pergunta deste trabalho:

- a) Quais são as estruturas necessárias para integração de técnicas de Dinâmica de Sistemas no ambiente de modelagem espacial TerraME?

A padronização para modelagem que se resulta da utilização da extensão disponibilizada responde a nossa segunda pergunta:

- b) Como expressar problemas de Dinâmica de Sistemas no ambiente de modelagem espacial TerraME de forma padronizada para reutilização?

O nível de abstração para implementação de modelos espaciais com Dinâmica de Sistemas acopla propriedades históricas e dinâmicas no espaço e tempo que possibilita construção de modelos computacionais formais para simulação de complexos sistemas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos modelos de sistemas que levam em consideração o ambiente para decisões e ações, trabalhar com a espacialização dos dados é essencial e ambientes de modelagem para tais modelos necessitam de disponibilizar funcionalidades que estimulam a percepção de impactos e relações existentes na dinâmica dos sistemas com a finalidade de possibilitar simulações para análise de cenários com menos influências dos sistemas humanos nos sistemas terrestres.

Após análise da literatura levantamos neste trabalho as necessidades de trabalhar com espacialização dos dados e com Dinâmica de Sistemas para modelagem de sistemas ambientais e após análises e testes no ambiente de modelagem espacial TerraME para utilização de técnicas de Dinâmica de Sistemas, nós propomos uma extensão com estruturas que possibilitam uso dessas técnicas de Dinâmica de Sistemas com estoques especializados.

Na extensão proposta foram construídas as estruturas no ambiente de modelagem TerraMe: (i) *Stock*, formada com as funcionalidades que oferecem suporte para espacialização de estoques de Dinâmica de Sistemas; (ii) *World*, composta de funcionalidades que oferecem suporte para trabalhar com estoques especializados e técnicas de Dinâmica de Sistemas; (iii) *SystemDynamicFunctions*, que reuni o conjunto de funcionalidade com técnicas de Dinâmica de Sistemas e técnicas do ambiente de modelagem espacial que podem ser reutilizadas durante a implementação de modelos. Estas oferecem suporte ao trabalhar com modelos espaciais que sofrem influência de atrasos em respostas na escala temporal, fluxos com realimentação e controle de fluxos por tendência. Elas se destacam principalmente devido à abstração da implementação durante a utilização para desenvolvimento de modelos.

Outro grande diferencial são os estoques especializados que possibilitam trabalhar com características biofísicas e quantitativas compostas em células. Além da representação no espaço, eles oferecem suporte para análise de como fluxos de entrada e saída afetam características específicas

de cada estoque. Sendo assim, estoques não são vistos como caixas pretas unitárias que apenas possuem dados quantitativos, mas um conjunto delimitado que possui características espaciais, quantitativas e outras de relevância específicas para cada tipo de modelo.

O estoque especializado também possibilita que durante as especificações de fluxos de entrada e fluxos de saída, o modelador utilize as diferentes técnicas para manipulação e tratamento da espacialização dos dados. No modelo de produção de milho, implementado neste trabalho, utilizamos informações de dados espaciais quanto à aplicação de fertilizantes. Esta informação alimenta os fluxos de produção de milho e, com os cenários gerados, podemos visualizar dinamicamente como a informação afeta a produção de uma determinada localidade. No modelo de desvio de água do Monolake, a espacialização do estoque oferece suporte para análise quanto ao impacto de regras complexas no ambiente.

A extensão proposta para o TerraME propõe etapas para descrição efetiva de modelos espaciais de forma a utilizar as capacidades de ambientes de modelagem espaciais e técnicas de Dinâmica de Sistemas, integrando funcionalidades de geoprocessamento e funcionalidades comportamentais de Dinâmica de Sistemas, além de explorar ferramentas do ambiente para a geração de cenários considerando modelagem em três dimensões, sendo elas: espacial, temporal e comportamental. No modelo de produção de milho estas dimensões podem ser percebidas em tempo de simulação. Nós utilizamos as funções de suavidade e tendência de Dinâmica de Sistemas, implementadas na extensão, para analisarmos a influência da aplicação de fertilizantes no tempo de crescimento e produção de milho.

A extensão desenvolvida com esse trabalho foi avaliada pelo acoplamento de técnicas de modelagem utilizadas para implementação de modelos que envolvem o ambiente com técnicas de Dinâmica de Sistemas. Este acoplamento oferece vantagem ao trabalhar com a variabilidade geográfica em modelos para análise do solo, clima, produções agrícolas,

variabilidade hídrica e outros aspectos físicos, químicos e biológicos que envolvem o ambiente.

Dois modelos foram desenvolvidos para explorar as relações de Dinâmica de Sistemas com modelagem espacial. Primeiramente foi implementado um modelo adaptado de Andrews Ford (1999), para comparação da elaboração do modelo com e sem as espacializações, e, desta forma, estudar as vantagens de trabalhar com estoques que são representados por células espaciais. Constatamos que das vantagens obtidas, as principais são padronização para modelagem de sistema com técnicas de Dinâmica de Sistemas, abstração da implementação de funções base de Dinâmica de Sistemas e geração de cenários que exploram ferramentas do ambiente TerraME para visualização da mudança dinâmica de estoques no espaço.

Posteriormente foi construído um modelo simplificado de produção de milho utilizando os recursos disponibilizados para identificar conjuntos de estoques com dados quantitativos e espaciais, desenvolver os fluxos que interagem com diversas características do solo utilizado, analisar o comportamento e dados do modelo no espaço e tempo.

Como trabalho futuro, pretendemos ampliar a extensão proposta para acoplar diferentes tipos de abordagens que agregam a modelagem de dinâmica de sistemas espaciais, possibilitando aprimoramento e melhorias na análise comportamental dos estoques especializados. Dentre estas melhorias podemos citar a análise de tendência de transformação dos estoques por análise da imagem gerada dinamicamente ao rodar o modelo. O referencial teórico é útil para o desenvolvimento de trabalhos para melhoria da estrutura computacional proposta.

Embora a extensão para o ambiente computacional TerraMe tenha se mostrado satisfatória, atendendo as necessidades de modelagem de Dinâmica de Sistemas Espaciais, para prover uma solução genérica, ela deve ser testada em outros modelos que envolvem o ambiente e Dinâmica de Sistemas.

Um desenvolvimento das estruturas propostas em um ambiente diferente do TerraMe pode beneficiar na identificação e validação mais ampla das estruturas propostas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A. P. D. **Modelagem de mudança do uso da terra na Amazônia: explorando a heterogeneidade intrarregional**. 2012. 206 p. (sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/08.10.18.21-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnJSY/M7t7e>>. Acesso em: 04 set. 2013..

AHMAD, S.; SIMONOVIC, S.P. Spatial system dynamics: new approach for simulation of water resources systems. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 18, n. 4, p. 331–340, 2004.

ALMEIDA, R. M.; Macau, E. E. N.; Franca, H.; Ramos, F. M.; Carneiro, T. G. S. Simulando padrões de incêndio no Parque Nacional das Emas, Goiás, Brasil In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA (GEOINFO), 10., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2008. v. 1. p. 10 – 20.

ANDRADE, P.R.; MONTEIRO, A.M.V.; CAMARA, G.; SANDRI, S. Games on cellular spaces: how mobility affects equilibrium. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)**. v.12, n.1, 2009.,

ANDRADE, A, L. Pensamento sistêmico: um roteiro básico para perceber as estruturas da realidade organizacional. PPGEP/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. REAd – **Revista Eletrônica de Administração**. Edição 5, v.3, n. 1, jun. 1997.

ANTLE M. J; STOOBVOGEL J. J. Incorporating systems dynamics and spatial heterogeneity in integrated assessment of agricultural production systems, AFSNRM, **Environment and Development Economics**, v.20, 2003.

ANTLE, J.M.; CAPALBO S.M. Agriculture as a managed ecosystem: implications for econometric analysis of production risk. In Just R.E.; Pope, R.D. (eds). **A comprehensive assessment of the role of risk in U.S. agriculture**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. p. 243-263.

ANTLE, J.M.; CAPALBO S.M. Econometric-process models for integrated assessment of agricultural production systems. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 83, n.2; p. 389–401 2001.

ANTLE, J.M. et. al. Econometric production models with endogenous input timing: an application to ecuadorian potato production. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 19, n. 1p. 1-18, 1994.

BERTRAND Y. ; GUILLEMET, P. **Les organisations, une approche systémique**. Paris, Montréal, Ste Foy, Ed Chotard, Agence d'Arc, Télé-Université, 1989.

von BERTALANFFY, L. **General system theory general systems**. New York, 1956. v. 1, p. 1-10.

Von BERTALANFFY, L. **General system theory**. New York: George Brazillier, 1969.

CÂMARA, G.; VINHAS, L.; FERREIRA, K.; QUEIROZ, G.; SOUZA, R.C.M.; MONTEIRO, A.M.; CARVALHO, M.T.; CASANOVA, M.A.; FREITAS, U.M. TerraLib: an open-source GIS library for large-scale environmental and socio-economic applications. In: HALL, B., LEAHY, M. (eds.). **Open source approaches to spatial data handling**. Berlin: Springer, 2008. p. 247-270.

CÂMARA, G.; AGUIAR, A. P.; ESCADA, M.I.; AMARAL, S.; CARNEIRO, T.G.S.; MONTEIRO, A.M.V.; ARAUJO, R.; VIEIRA, I.; BECKER, B. 2005. Amazonian deforestation models. **Science**, v. 307, n. 5712, p. 1043-1044, Feb. 2005. (INPE-12783-PRE/8073)..

CÂMARA, G.; CASANOVA, M.A.; HEMERLY, A.S.; MAGALHÃES, G.C.; MEDEIROS, C.M.B. **Anatomia de sistemas de informações geográficas**. São José dos Campos: INPE, 1996. 205 p. (INPE-8094-RPQ/716). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/10.07.13.36>>. Acesso em: 05 set. 2013.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. 344 p. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43>>. Acesso em: 05 set. 2013.

CARNEIRO T.G.S.; LIMA, T.F.M.; FARIA, S.D. TerraLAB – using free software for earth system research and free software development. In: WORKSHOP DE SOFTWARE LIVRE – WSL, 10., 2009, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Fórum Internacional Software Livre, 2009.

CARNEIRO, T.G.S. **Nested-CA**: a foundation for multiscale modeling of land use and land change. São José dos Campos: INPE, 2006.

CARNEIRO, T.G.S.; MARETTO, E.V.; CÂMARA, G. Irregular cellular spaces: supporting realistic spatial dynamic modeling over geographical databases. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA, 2008, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, 2008.

CARNEIRO, T. G. S.; ANDRADE, P. R.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; PEREIRA, R. R. An extensible toolbox for modeling nature-society interactions. **Environmental Modelling & Software**, v. 46, p. 104–117, 2013. doi: <10.1016/j.envsoft.2013.03.002>.

CAPRA, F. **As conexões ocultas**. São Paulo: Cultrix, 2002.

CELLIER, F. E. World3 in modelica: creating system dynamics models. In: INTERNATIONAL MODELICA CONFERENCE, 6., 2008, Bielefeld, Germany. **Proceedings...** Bielefeld, 2008. p. 393-400.

DESPOTAKIS, V.K.; SCHOLTEN, H.J.; NIJKAMP, P. Spatial dynamic modeling. In: EUROPEAN GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS CONFERENCE (EGIS '91) SPATIAL ANALYSIS WORKSHOP, 2., 1991, Brussels. **Proceedings...** Brussels, 1991.

DOSWELL, A. **Foundations of business information systems**. New York: Plenum press, 1985.

FERREIRA, A. B. H. **Dicionário eletrônico século XXI** — versão 3.0. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1999.

DOURADO NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J.A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I. uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, v.55, n. especial Piracicaba, p.46 - 50, 1998a.

EBERLEIN, R. L.; PETERSON D. W. Understanding models with Vensim™. **European Journal of Operational Research**, v. 59, n. 1, 26 May p. 216–219, 1992.

ELMQVIST H. **A structured model language for large continuous systems**. PhD Thesis ISRN LUTFD2/TFRT--1015--SE, Department of Automatic Control, Lund University, Sweden, May 1978

EMERY, F. E. **Systems thinking**: selected readings. Middlesex: Penguin Books, 1972

ERICKSEN, P. J., INGRAM, J. S.I.; LIVERMAN, D. M. Food security and global environmental change: emerging challenges. **Environmental Science & Policy**, v. 12, n. 4, June, p. 373-377, 2009. ISSN 1462-9011,

FERNANDES, A. C. **Scorecard dinâmico** – em direção à integração da dinâmica de sistemas com o balanced scorecard. Tese (Doutorado em Ciências em Produção de Alimentos) - COPPE/UFRJ, 2003.

- FORRESTER, J. W. **Industrial dynamics**. Cambridge: M.I.T. Press, 1961.
- FORRESTER, J. W. **Urban dynamics**. Washington: Transportation research board Press, 1969.
- FORRESTER, J. W. **World dynamics**. Waltham: Pegasus Communications, 1972.
- FORRESTER, J. W. The model versus a modeling process. **System Dynamics Review**, v.1, p. 133–134, 1985. doi: 10.1002/sdr.4260010112.
- FORRESTER, J. W. Policies, decisions and information sources for modeling. **European Journal of Operational Research**, v. 59, n. 1, p. 42-63, 1992.
- FORRESTER, J. W. **System dynamics** - the next fifty years. **System Dynamics Review**, v. 23, n. 2-3, p. 359–370, 2007.
- FLOOD, R.L.; JACKSON, M.C.; KEYS, P. **System prospects: the next ten years of systems research**. New York: Plenum Press, 1989.
- Grossman, W.D.; Eberhardt, S. Geographical information systems and dynamic modelling. **Annals of Regional Science**, v. 26, p. 53-66, 1992.
- GROOTHEDDE, B. **Multimodal transport in the Netherlands, the quality of the multimodal network**. Delft: University of Technology Delft, 1997. (in Dutch).
- Hartt, M. **Sea level rise tool**. Ottawa: University of Ottawa, 2009. GIS Day Poster Presentation. 18/11/09.
- HARTT M.D. **Geographic information systems and system dynamics – Modelling the impacts of storm damage on coastal communities**. Master's program in systems science faculty of graduate and postdoctoral studies, University of Ottawa, 2011.
- HOFKIRCHNER W. A new way of thinking and a new world view: on the philosophy of self-organisation. **Cybernetics & Human Knowing**, v. 11, n. 1, p. 63-78, 2004 .
- IERUSALIMSCHY, R.; FIGUEIREDO, L.H.; CELES, W. Lua-an extensible extension language. **Software: Practice & Experience**, v. 26, n. 6, p. 635-652, 1996..
- KRIPPNER S. título 3: Systems theories: Their origins, foundations, and development. In: JORDAN, J. C. (ed.). **Systems theories and a priori aspects of perception, advances in psychology**, Amsterdam: North-Holland/Elsevier, 1998. Cap. 3, v. 126, p. 47-74.

- LANA R. **Modelos dinâmicos acoplados para simulação da ecologia do vetor *Aedes aegypti***. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Biomas Tropicais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- LUHMANN, N. **Social systems**. Stanford: Stanford University Press, 1995.
- MEADOWS, D. L. et al. **Dynamics of growth in a finite world**. Cambridge: WrightAllen Press, 1974.
- MEADOWS, D. H. et al. **Limits to growth, 30 years update**. Chelsea: Chelsea Green Publishing, 2004.
- MEDEIROS JR, J. V. **Aplicação do modelo scorecard dinâmico no processo de formulação da estratégia em empresa de pequeno porte**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão) - PPGA/UFRN, Natal, 2004.
- MÉLÈSE, J. **A gestão pelos sistemas**. Rio de Janeiro: Ao livro técnico, 1973.
- MUETZELFELDT R.; MASSHEDER J. The simile visual modelling environment. **Europ. J. Agronomy**, v. 18, p. 345-358, 2003.
- MUNIZ I. C. et al. Modelagem e simulação na agropecuária. **Pubvet**, v. 1, n.11, 2007.
- NYERGES, T. L. Schema integration analysis for GIS database development. **International Journal of Geographic Information Systems** v. 3, n.2: p. 153-183, 1989.
- NYERGES, T. L. Geographic information abstractions: conceptual clarity for geographic modeling. **Environment and Planning A**, v. 23, p. 1483-1499, 1991.
- ROBERTS, N. D. F. et al. **Introduction to computer simulation: the system dynamics modeling approach**. Reading, MA: Addison-Wesley; reprinted by Productivity Press, 1983.
- SENGE, P. M. **A quinta disciplina**. São Paulo: Best seller, 1990.
- SIMON, A. L. . **Made in Hungary: Hungarian contributions to universal culture**. Simon Publications, 1998. p. 207. ISBN 0-9665734-2-0.
- STICHWEH, R. **Towards a general theory of function system crisis**. Lucerne: University of Lucerne, 2011.
- STERMAN, J. D. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. McGraw-Hill, New York, 2000.

SYSTEM DYNAMIC SOCIETY (ISI). **Journal Citation Reports © Ranking:** 2011: 25/45 (Social Sciences Mathematical Methods); 109/168 (Management) Online ISSN: 1099-1727.

SYSTEM DYNAMICS SOCIETY. **What is System Dynamics?** 2009. [http://www.systemdynamics.org/what\\_is\\_system\\_dynamics.html](http://www.systemdynamics.org/what_is_system_dynamics.html) Edited 26-01-2009. Accessed 13-11-2009 Accessed 22/10/09.

CARNEIRO T.G.S.; ANDRADE, P.R.; CÂMARA, C.; MONTEIRO, A. M. V.; PEREIRA, R.R. An extensible toolbox for modeling nature–society interactions. **Environmental Modelling & Software**, v 46, p. 104-117, 2014

TOMLIN, C.D. **Geographic information systems and cartographic modeling.** Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990.

THORNLEY, J.H.M. **Grassland dynamics:** an ecosystem simulation model. Wallingford: CAB International, 1998. 241p.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modeling.** Oxford: Oxford University Press, 1990. 669p.

von NEUMANN, J. Theory of self-reproducing automata. In: BURKS, A.W. **Essays on cellular automata.** Illinois: University of Illinois Press, Urbana, 1966. p. 3-64 (Essay One).

WOOLDRIDGE, M.J.; JENNINGS, N.R. Intelligent agents: theory and practice. **Knowledge Engineering Review**, v. 10, n. 2, 1995.

## APÊNDICE A

Segue abaixo a implementação do estoque especializado:

```
-- spatialStock variables -----
Stock = { spatialStock,    -- spatial spatialStock location represented with
Cellular Space

    location,              -- set of spatial spatialStock coordinates

    stockTotalValue,      -- represents the total quantity value of a stock

    inflows,               -- set of inflows functions

    outflows,             -- set of outflows functions

    xdim,                  -- set map's number of columns, in the case of
creating a  cellularityspace with no need to load from a database.

    ydim,                  -- set map's number of columns, in the case of
creating a  cellularityspace with no need to load from a database.

    name,                  -- stock name

    unit,                  -- stock unit

    uniqueID,              -- stock unique ID

    showSpatialStock

}

-- Stock INSERT INFLOW -----

-- @param function funcArg - represents a flow
function Stock:insertInflow(funcArg)

    -- Position where the inflow will be inserted

    position = 1

    -- Counts positions occupied

    for I, func in ipairs(self.inflows) do

        position = position + 1
```

```

    end

    -- Inserts function on the last position
    self.inflows[position] = funcArg

end

-- Stock INSERT OUTFLOW -----
-- @param function funcArg - represents a flow
function Stock:insertOutflow(funcArg)

    -- Position where the outflow will be insterted
    position = 1

    -- Counts positions ocupied
    for I, func in ipairs(self.outflows) do
        position = position + 1
    end

    -- Inserts function on the last position
    self.outflows[position] = funcArg

end

-- Stock SET SPATIAL STOCK -----
function Stock:setStock(ssdStock)

    self.spatialStock = ssdStock

end

-- Stock SET UNIQUE SPATIAL STOCK IDENTIFIER -----
-- @param spatialStockId
function Stock:setSpatialStockUniqueID(spatialStockId)

    self.uniqueID = spatialStockId

end

-- Stock SET NAME -----

```

```

-- @param stockName
function Stock:setName(stockName)
    self.name = stockName
    for i, cell in ipairs(self.spatialStock.cells) do
        cell.name = stockName
    end
end

-- Stock SET UNIT -----
-- @param stockUnit
function Stock:setUnit(stockUnit)
    self.unit = stockUnit
end

-- Stock SET VALUE IN A SPECIFIC CEL -----
-- @param spatialStockCell
function Stock:setCellValueInSpatialStock(spatialStockCell)
    for i, cell in ipairs(self.spatialStock.cells) do
        if cell.x == spatialStockCell.x and cell.y == spatialStockCell.y then
            cell.value = spatialStockCell.value
        end
    end
end

-- Stock SET VALUE IN A SPECIFIC CEL BY COORDINATES-----
-- @param value
-- @param coordX
-- @param coordY
function Stock:setCellValueByCoordinates(value, coordX, coordY)

```

```

    for i, cell in ipairs(self.spatialStock.cells) do
        if cell.x == coordX and cell.y == coordY then
            cell.value = value
        end
    end
end

-- Stock SET TOTAL VALUE OF STOCK -----
-- @param totalValue
function Stock:setStockTotalValue(totalValue)
    self.stockTotalValue.value = totalValue
end

-- Stock SET INITIAL STOCK COORDINATES-----
-- @param location
function Stock:setLocation(spatialStockLocation)
    for key, coord in pairs(spatialStockLocation) do
        self.location[key] = coord
    end
end

-- Stock SET MAP'S NUMBER OF COLUMNS -----
-- @param mapYDim - Map's column amount
function Stock:setXDim(mapXDim)
    self.xdim = mapXDim

    self.spatialStock = CellularSpace{ -- spatialStock location's
representation with Cellular Space

        xdim = tonumber(self.xdim),
        ydim = tonumber(self.ydim),

```

```

    }

end

-- Stock SET MAP'S NUMBER OF ROWS -----
-- @param mapYDim - Map's row amount
function Stock:setYDim(mapYDim)
    self.ydim = mapYDim

    self.spatialStock = CellularSpace{ -- spatialStock location's
representation with Cellular Space
        xdim = tonumber(self.xdim),
        ydim = tonumber(self.ydim),
    }

end

-- Stock SET SHOW ON MAP -----
-- @param setShowOnMap - boolean
function Stock:setShowSpatialStock(setShowOnMap)
    self.showSpatialStock = setShowOnMap
end

-- Stock RETURN SHOW ON MAP -----
function Stock:getShowSpatialStock()
    return self.showSpatialStock
end

-- Stock RETURN SPATIAL STOCK-----
function Stock:getStock()
    return self.spatialStock
end

-- Stock RETURN TOTAL VALUE -----

```

```

function Stock:getTotalValue()
    return self.stockTotalValue.value
end

-- Stock RETURN NAME -----
function Stock:getName()
    return self.name
end

-- Stock RETURN UNIT -----
function Stock:getUnit()
    return self.unit
end

-- Stock RETURN VALUE OF A SPECIFIC CELL-----
function Stock:getSpatialStockValue(coordX, coordY)
    for i, cell in ipairs(self.spatialStock.cells) do
        if cell.x == coordX and cell.y == coordY then
            return cell.value
        end
    end
end

-- Stock RETURN SPATIAL STOCK COORDINATES-----
function Stock:getLocation()
    return self.location
end

-- Stock RETURN UNIQUE SPATIAL STOCK IDENTIFIER -----
function Stock:getStockUniqueID()
    return self.uniqueID
end

```

```

end

-- Stock RETURN NUMBER OF COLUMNS FROM SPATIAL STOCK -----
function Stock:getXDim()
    return self.xdim
end

-- Stock RETURN NUMBER OF ROWS -----
function Stock:getYDim()
    return self.ydim
end

-- Stock UPDATE TOTAL VALUE -----
function Stock:updateTotalStockValue()
    sumStockValue = 0
    for i, cell in ipairs(self.spatialStock.cells) do
        if cell.value ~= nil then
            sumStockValue = cell.value + sumStockValue
        end
    end
    self.stockTotalValue.value = sumStockValue
end

-- Stock UPDATE SPATIAL STOCK NAME -----
function Stock:updatename()
    for i, cell in ipairs(self.spatialStock.cells) do
        cell.name = self.name
    end
    --stockTotalValue.name = self.name
end

End

```

**-- Stock STARTS NEW INSTANCE -----**

```
function Stock:startStock(o)
```

```
    o = o or {}
```

```
    setmetatable(o, self)
```

```
    self.__index = self
```

```
    o.spatialStock = CellularSpace{ -- spatialStock location  
represented with Cellular Space
```

```
        xdim = 0,
```

```
        ydim = 0,
```

```
        name = ""
```

```
    }
```

```
    o.stockTotalValue = Cell{ -- static spatialStock location represented  
with Cellular Space
```

```
        name = "",
```

```
        value = 0
```

```
    }
```

```
    o.location = {
```

```
        coordX = {}, -- set of spatial spatialStock coordinate X
```

```
        coordY = {} -- set of spatial spatialStock coordinate Y
```

```
    }
```

```
    o.inflows = {} -- set of inflows functions
```

```
    o.outflows = {} -- set of outflows functions
```

```
    o.xdim = 0 -- set map's number of columns
```

```
    o.ydim = 0 -- set map's number of rows
```

```
    name = "Spatial System Dynamic Stock"
```

```
    unit = "Default"
```

```
    uniqueID = 0
```

```
o.showSpatialStock = true  
return o  
end
```



## APÊNDICE B

Segue abaixo a implementação do tipo de dado *World*:

**--IMPORT STOCK**

dofile("Stock.lua")-----

**-- World**

**-- World variables -----**

World = {

    stocks,      **-- set of Space Stocks**

    auxiliary,   **-- set of Parameter functions**

    start,       **-- simulation start time**

    dt,          **-- simulation dt**

    timeClock,   **-- simulation timeClock**

    worldName,   **-- name for map scenario**

    spatialUnit, **-- value for cellular space unit**

    legend,      **-- spatial map`s legend**

    xdim,        **-- number of columns, in the CellularSpace**

    ydim,        **-- number of rows, in a CellularSpace**

}

**-- World INSERT STOCK -----**

**-- @param stockArg - Stock to be inserted**

function World:insertStock(stockArg)

**-- Position where the stock will be insterted**

    position = 1

**-- Counts positions ocupied**

    for I, stockCount in pairs(self.stocks) do

```

        position = position + 1
    end

    -- Inserts function on the last position
    self.stocks[position] = stockArg
end

-- World INSERT Parameter -----
-- @param function funcArg - represents a Parameter
function World:insertParameter(funcArg)

    -- Position where the parameter will be insterted
    position = 1

    -- Counts positions ocupied
    for I, params in pairs(self.Parameter) do
        position = position + 1
    end

    -- Inserts function on the last position
    self.Parameter[position] = funcArg
end

-- World SET MAP SHOW MAP -----
-- @param showMapCond - Show map boolean
function World:setShowMap(showMapCond)

    self.showMap = showMapCond
end

-- World SET MAP SHOW GRAPHIC -----
-- @param showGrapCond - Show Dynamic Graphic boolean
function World:setShowGraphics(showGrapCond)

    self.showGraph = showGrapCond

```

end

**-- World SET LEGEND -----**

**-- @param mapLegend - Legend to be inserted**

function World:setLegend(mapLegend)

    self.legend = mapLegend

end

**-- World SET MAP NAME -----**

**-- @param mapName - Name to be set**

function World:setMapName(mapName)

    self.worldName = mapName

end

**-- World SET MAP'S NUMBER OF COLUMNS FOR MAP SCENARIOS-**

**-- @param mapYDim - Map's column amount**

function World:setXDim(mapXDim)

    self.xdim = mapXDim

end

**-- World SET MAP'S NUMBER OF ROWS FOR MAP SCENARIOS-----**

**-- @param mapYDim - Map's row amount**

function World:setYDim(mapYDim)

    self.ydim = mapYDim

end

**-- World SET MAP UNIT -----**

**-- @param mapUnit - Unit to be set**

function World:setUnit(mapUnit)

    self.spatialUnit = mapUnit

end

**-- World RETURN Parameter FROM INDEX -----**

```
function World:getParameter(index)
    return self.Parameter[index]
end
```

**-- World RETURN MAP LEGEND-----**

```
function World:getLegend()
    return self.legend
end
```

**-- World RETURN MAP'S NUMBER OF COLUMNS -----**

```
function World:getXDim()
    return self.xdim
end
```

**-- World RETURN MAP'S NUMBER OF ROWS-----**

```
function World:getYDim()
    return self.ydim
end
```

**-- World RETURN SIMULATION TIME -----**

```
function World:getSimulationTime()
    return self.timeClock
end
```

**-- World RETURN MAP BASE UNIT -----**

```
function World:getUnit()
    return self.spatialUnit
end
```

end

**-- World VERIFY DIMENSIONS-----**

function World:verifyDim()

    for I, stockVariable in ipairs(self.stocks) do

        xdimAux = stockVariable:getXDim()

        ydimAux = stockVariable:getYDim()

        if xdimAux > self.xdim then

            self.xdim = xdimAux

        end

        if ydimAux > self.ydim then

            self.ydim = ydimAux

        end

    end

end

**-- World UPDATE CALCULATION -----**

**-- Calculates the relation between stocks and flow in a certain time**

**-- @param integer timClock - present time**

function World:update(stockVariable, timeClock)

    print("-----")

    print("The run time is "..timeClock)

**-- calculates inflow (expects use of automatic update of spatialStock  
by SetStock )**

    stockVariable:updateTotalStockValue()

    stockVariable:updatename()

    local totalStockValueHist = stockVariable:getTotalValue()

    local inflowExecuted = false

```

for I, funcInfl in ipairs(stockVariable.inflows) do
    funcInfl()
    inflowExecuted = true
end
if inflowExecuted == true then
    stockVariable:updateTotalStockValue()
    local totalStockValue = stockVariable:getTotalValue()
    if totalStockValue ~= totalStockValueHist then
        local difference = totalStockValue - totalStockValueHist
        print("Inflow quantity: "..difference)
    end
end
end

```

**-- calculates outflow (expects use of automatic update of spatialStock by SetStock )**

```

local outflowExecuted = false
totalStockValueHist = stockVariable:getTotalValue()
for I, funcInfl in ipairs(stockVariable.outflows) do
    funcInfl()
    outflowExecuted = true
end
if outflowExecuted == true then
    stockVariable:updateTotalStockValue()
    local totalStockValue = stockVariable:getTotalValue()
    if totalStockValue ~= totalStockValueHist then
        local difference = totalStockValue - totalStockValueHist
        print("Outflow quantity: "..difference)
    end
end

```

```

        end
    end
    print("-----")
end

-- World SIMULATION -----
-- Simulates model
-- @param integer endTime - final simulation time
function World:run(endTime)
    self:verifyDim()

    --starts general scenario map
    spatialSD = CellularSpace{ -- Stock location's representation with
    Cellular Space
        xdim = tonumber(self.xdim),
        ydim = tonumber(self.ydim),
    }

    -- initiates spatialSD with default value
    for i, cell in ipairs(spatialSD.cells) do
        cell.value = 0
    end

    -- initiates spatialSD with each stock
    for I, stockVariable in ipairs(self.stocks) do
        if stockVariable:getShowSpatialStock() == true then
            stockSpace = stockVariable:getStock()
            for i, cellAux in ipairs(stockSpace.cells) do
                for i, cell in ipairs(spatialSD.cells) do
                    if cellAux.x == cell.x and cellAux.y ==
cell.y then

```

```

        cell.value = cellAux.value
        cell.name = cellAux.name
    end
end
end
end
end

-- creates map observer for spatial analysis
spatialSD:createObserver(-- creates a CellSpace observer
    OBSERVERS.MAP, -- observer's type
    {"value"}, -- stocks value representation
    {legend} -- map's legend
)
spatialSD:notifyObservers()

-- creates observers graph for each stock
for I, stockVariable in ipairs(self.stocks) do

    stockVariable.stockTotalValue:createObserver(OBSERVERS.DYNAMIC
GRAPHIC,
        {"value"},
        {"Stock: "..stockVariable.getName(),
stockVariable:getUnit(),
"time",
stockVariable.getName()}
    )
end

-- start simulation from start time to end time

```

```

for J = self.start, endTime, self.dt do
    -- Counts updates stockLocation.stocks
    for I, stockVariable in ipairs(self.stocks) do
        self.timeClock = J
        -- Updates the stock variable
        self:update(stockVariable, J)
        -- Notifies DYNAMICGRAPHIC
        stockVariable:updateTotalStockValue()
        stockVariable.stockTotalValue:notifyObservers(J)
        if stockVariable:getShowSpatialStock() == true then
            stockSpace = stockVariable:getStock()
            for i, cellAux in ipairs(stockSpace.cells) do
                for i, cell in ipairs(spatialSD.cells) do
                    if cellAux.x == cell.x and
cellAux.y == cell.y then
                        cell.value =
cellAux.value
                        cell.name =
cellAux.name
                    end
                end
            end
        end
        spatialSD:notifyObservers()
    end
end
end
end

```



## APÊNDICE C

Segue abaixo a implementação do tipo de dado modelo Monolake:

```
--*****
--
-- This model is adapted from Andrew Ford, 1999 - Modeling the
enviroment
-- implemented with the Framework for Modeling Spatial System
Dynamics
--*****
-----
--Framework SSD-----
dofile("Stock.lua")
dofile("World.lua")
dofile("SpatialLakeModelData.lua")
--*****\
--*****\
-- water in lake(t) = water in lake (t - dt) + (flow past diversion points +
--   other inflows + precipitation - other outflow - evaporation) * dt
-- INIT water in lake = 2228
-- INFLOWS:
-- inflow = flowDiversion + otherIn + Precipitation
-- OUTFLOWS:
-- outflow = otherOut + evaporation
-- flowDiversion = sierraRunoff - export
-- otherIn = 47.6
-- precipitation = surfaceArea * precipitationRate
```

```

-- otherOut = 33.6
-- evaporation = surfaceArea * evaporationRate
-- evaporationRate = 3.75
-- export = 100
-- precipitationRate = 0.667
-- sierraRunoff = 150
--surfaceArea starts with = 39
--Volume of Water = 0 surfaceArea = 0
--Volume of Water = 1000 surfaceArea = 24.7
--Volume of Water = 2000 surfaceArea = 35.3
--Volume of Water = 3000 surfaceArea = 48.6

```

```

__*****\

```

```

-----

```

**--Initializes Stock and World**

```

monolake = Stock:startStock()
spatialData = MonolakeSpatialData:startMonolakeSpatialData()
w = World:startWorld()

```

**-- Space legend -----**

```

legend = Legend{
    type = TYPES.NUMBER, -- defines the data type represented
    slices = 10, -- defines number of represented stocks
    maximum = 4, -- maximum value represented
    minimum = 0, -- minimum value represented
    colorBar1 = { -- defines color for each stock
        {WHITE, 0}, -- No water

```

```

        {BLUE, 2},    -- Deep water
        {BLACK, 4}  -- Deeper water
    }
}

-- Spatialization 1 -----
-- Parameter 1 -----

local getSurfaceArea = function(volumeOfWater)
    surfaceArea = 0
    if(volumeOfWater == 0) then
        surfaceArea = 0
    elseif (volumeOfWater > 0 and volumeOfWater <=
1000) then
        surfaceArea = 24.7
    elseif (volumeOfWater > 1000 and volumeOfWater
<= 2000) then
        surfaceArea = 35.3
    elseif (volumeOfWater > 2000 and volumeOfWater
<= 2500) then
        surfaceArea = 39
    elseif (volumeOfWater > 2500 and volumeOfWater
<= 3000) then
        surfaceArea = 48.6
    elseif (volumeOfWater > 3000 and volumeOfWater
<= 4000) then
        surfaceArea = 54.3
    elseif (volumeOfWater > 4000 and volumeOfWater
<= 5000) then
        surfaceArea = 57.2

```

```

elseif (volumeOfWater > 5000 and volumeOfWater
<= 6000) then
    surfaceArea = 61.6
elseif (volumeOfWater > 6000 and volumeOfWater
<= 7000) then
    surfaceArea = 66.0
elseif (volumeOfWater > 7000 and volumeOfWater
<= 8000) then
    surfaceArea = 69.8
end
return surfaceArea
end

```

**-- Parameter 2 -----**

```

local getElevation = function(volumeOfWater)
    elevation = 0
    if (volumeOfWater == 0) then
        elevation = 6224
elseif (volumeOfWater > 0 and volumeOfWater <=
1000) then
        elevation = 6335
elseif (volumeOfWater > 1000 and volumeOfWater
<= 2000) then
        elevation = 6369
elseif (volumeOfWater > 2000 and volumeOfWater
<= 3000) then
        elevation = 6392
elseif (volumeOfWater > 3000 and volumeOfWater
<= 4000) then
        elevation = 6412

```

```

elseif (volumeOfWater > 4000 and volumeOfWater
<= 5000) then
    elevation = 6430
elseif (volumeOfWater > 5000 and volumeOfWater
<= 6000) then
    elevation = 6447
elseif (volumeOfWater > 6000 and volumeOfWater
<= 7000) then
    elevation = 6463
elseif (volumeOfWater > 7000 and volumeOfWater
<= 8000) then
    elevation = 6477
end
return elevation
end

```

**-- Parameter 3 -----**

```

local getEvaporationRate = function()
    local EVAPORATION_RATE_CONST = 3.75
    return EVAPORATION_RATE_CONST
end

```

end

**-- Parameter 4 -----**

```

local getPrecipitationRate = function()
    local PRECIPITATION_RATE_CONST = 0.667
    return PRECIPITATION_RATE_CONST
end

```

end

**-- Parameter 5 -----**

```

local getSierraRunoff = function()

```

```

        local SIERRA_RUNOFF_CONST = 150
        return SIERRA_RUNOFF_CONST
    end

-- Parameter 6 -----
local getExport = function()
    local EXPORT_CONST = 100
    return EXPORT_CONST
end

-- Parameter 7 -----
local getNetGrantLakeEvaporation = function()
    local NET_GRANT_LAKE_EVAPORATION = 1.3
    return NET_GRANT_LAKE_EVAPORATION
end

-- Parameter 8 -----
local getEvapotranspiration = function()
    local EVAPOTRANSPIRATION_CONST = 13
    return EVAPOTRANSPIRATION_CONST
end

-- Parameter 9 -----
local getBottomEvaporation = function()
    local BOTTOM_EVAPO_CONST = 12
    return BOTTOM_EVAPO_CONST
end

-- Parameter 10 -----
local getGroundWaterExport = function()
    local GROUND_WATER_EXPORT = 7.3

```

```

        return GROUND_WATER_EXPORT
    end

-- Parameter 11 -----
local getUngauggedSierra = function()
    local UNGAUGED_SIERRA = 17
    return UNGAUGED_SIERRA
end

-- Parameter 12 -----
local getNonSierraRunoff = function()
    local NON_SIERRA_RUNOFF = 20
    return NON_SIERRA_RUNOFF
end

-- Parameter 13 -----
local getNetLandPrecipitation = function()
    local NET_LAND_PRECIPITATION = 9
    return NET_LAND_PRECIPITATION
end

-- Parameter 14 -----
local getDiversionInflow = function()
    local DIVERSION_INFLOW = 1.6
    return DIVERSION_INFLOW
end

-- OUTFLOW 1 -----
local outflowEvaporation = function()
    local evaporation = 0

```

```

local volumeOfWater = 0
for I, stockVariable in ipairs(w.stocks) do
    if
        stockVariable:getName() == "monolake" then

            volumeOfWater =
stockVariable:getTotalValue()

            end

        end

        surfaceArea = w:getParameter(1)
        evaporationRate = w:getParameter(3)
        evaporation =
surfaceArea(volumeOfWater)*evaporationRate()

        spatial = CellularSpace{ -- spatialStock location
represented with Cellular Space

            xdim = 55,
            ydim = 55
        }

        spatial = monolake:getStock()
        for i, cell in ipairs(spatial.cells) do
            if cell.value > 0 then
                cellCount = cellCount + 1
            end
        end

        cellEvaporation = evaporation/cellCount
        for i, cell in ipairs(spatial.cells) do
            if cell.value > 0 then
                cell.value = cell.value - cellEvaporation

```

```

end
end
monolake:setStock(spatial)

end

-- OUTFLOW 2 -----
local outflowOtherOut = function()
    otherOut = 0
    netGrantEvaporation = w:getParameter(7)
    evapotranspiration = w:getParameter(8)
    bottonEvaporation = w:getParameter(9)
    groundWaterExport = w:getParameter(10)
    otherOut = netGrantEvaporation() + evapotranspiration()
        + bottonEvaporation() + groundWaterExport()

    spatial = CellularSpace{ -- spatialStock location
represented with Cellular Space
        xdim = 55,
        ydim = 55
    }

    spatial = monolake:getStock()
    for i, cell in ipairs(spatial.cells) do
        if cell.value > 0 then
            cellCount = cellCount + 1
        end
    end

    end

    cellOtherOut = otherOut/cellCount
    for i, cell in ipairs(spatial.cells) do

```

```

        if cell.value > 0 then
            cell.value = cell.value - cellOtherOut
        end
    end
end
monolake:setStock(spatial)
end

-- INFLOW 1 -----
local inflowSierraRunOff = function()
    flowDiversion = 0
    sierraRunoff = w:getParameter(5)
    export = w:getParameter(6)
    flowDiversion = sierraRunoff() - export()
    spatial = CellularSpace{ -- spatialStock location
represented with Cellular Space
                                xdim = 55,
                                ydim = 55
                                }
    spatial = monolake:getStock()
    cellCount = 0
    for i, cell in ipairs(spatial.cells) do
        if cell.value > 0 then
            cellCount = cellCount + 1
        end
    end
end
cellFlowDiversion = flowDiversion/cellCount
for i, cell in ipairs(spatial.cells) do

```

```

        if cell.value > 0 then
            cell.value = cell.value + cellFlowDiversion
        end
    end
end
monolake:setStock(spatial)
end

-- INFLOW 2 -----
local inflowPrecipitation = function()
    local precipitation = 0
    local volumeOfWater = 0
    for I, stockVariable in ipairs(w.stocks) do
        if stockVariable:getName() == "monolake" then
            volumeOfWater =
stockVariable:getTotalValue()
        end
    end
    surfaceArea = w:getParameter(1)
    precipitationRate = w:getParameter(4)
    precipitation =
surfaceArea(volumeOfWater)*precipitationRate()
    spatial = CellularSpace{ -- spatialStock location
represented with Cellular Space
                                xdim = 55,
                                ydim = 55
                                }
    spatial = monolake:getStock()
    for i, cell in ipairs(spatial.cells) do

```

```

        if cell.value > 0 then
            cellCount = cellCount + 1
        end
    end
end
cellPrecipitation = precipitation/cellCount
for i, cell in ipairs(spatial.cells) do
    if cell.value > 0 then
        cell.value = cell.value + cellPrecipitation
    end
end
end
monolake:setStock(spatial)
end

```

**-- INFLOW 3 -----**

```

local inflowOtherIn = function()
    otherIn = 0
    ungaugedSierra = w:getParameter(11)
    nonSierra = w:getParameter(12)
    netLandPrecipitation = w:getParameter(13)
    diversionInflow = w:getParameter(14)
    otherIn = ungaugedSierra() + nonSierra()
        + netLandPrecipitation() + diversionInflow()
    spatial = CellularSpace{ -- spatialStock location
represented with Cellular Space
        xdim = 55,
        ydim = 55
    }

```

```

    spatial = monolake:getStock()
    for i, cell in ipairs(spatial.cells) do
        if cell.value > 0 then
            cellCount = cellCount + 1
        end
    end
    cellOtherIn = otherIn/cellCount
    for i, cell in ipairs(spatial.cells) do
        if cell.value > 0 then
            cell.value = cell.value + cellOtherIn
        end
    end
    monolake:setStock(spatial)

end

print("-----")

print("-----")

print("Monolake simulation mode..")
monolake:setName("monolake")
monolake:setUnit("water (KAF)")

--Load spatial Data loader
monolakeSpatialData = MonolakeSpatialData:startMonolakeSpatialData()

--Cellspace to load monolake Spatial Data
spatial = CellularSpace{ -- spatialStock location representated with Cellular Space
    xdim = 55,

```

```
ydim = 55  
}
```

**--Load spatial data**

```
spatial = monolakeSpatialData:getSpatialMonoLakeData()
```

**-- Set stock map dimension**

```
monolake:setXDim(55)
```

```
monolake:setYDim(55)
```

**-- Set stock spatial data**

```
monolake:setStock(spatial)
```

```
monolake:updateTotalStockValue()
```

**-- Set inflows**

```
monolake:insertInflow(inflowSierraRunOff)
```

```
monolake:insertInflow(inflowPrecipitation)
```

```
monolake:insertInflow(inflowOtherIn)
```

**-- Set outflows**

```
monolake:insertOutflow(outflowEvaporation)
```

```
monolake:insertOutflow(outflowOtherOut)
```

**-- Set auxiliaries**

```
w:insertParameter(getSurfaceArea )
```

```
w:insertParameter(getElevation)
```

```
w:insertParameter(getEvaporationRate)
```

```
w:insertParameter(getPrecipitationRate)
```

```
w:insertParameter(getSierraRunoff)
```

```
w:insertParameter(getExport)
```

```
w:insertParameter(getNetGrantLakeEvaporation)
```

```
w:insertParameter(getEvapotranspiration)
```

```
w:insertParameter(getBottomEvaporation)
w:insertParameter(getGroundWaterExport)
w:insertParameter(getUngaugedSierra)
w:insertParameter(getNonSierraRunoff)
w:insertParameter(getNetLandPrecipitation)
w:insertParameter(getDiversionInflow)
```

**--Insert Stock into the World**

```
w:insertStock(monolake)
```

**--Load legend**

```
w:setLegend(legend)
w:setMapName("Mono Lake")
w:setUnit("KFA")
```

**--Set scenerio dimation**

```
w:setXDim(55)
w:setYDim(55)
```

**--Run the model from 2000 to 2050**

```
w.start = 2000
w.dt = 1
w.run(2050)
```