



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Plano de Trabalho

Ambientes Computacionais para Modelagem, Simulação e Visualização de Sistemas Dinâmicos Complexos Espacialmente Explícitos:

Modelagem Acoplada de Sistemas Sociais e Naturais para
Estudos de Impacto e Adaptação às Mudanças Climáticas
e Ambientais

Pedro Ribeiro de Andrade Neto

Centro de Ciência do Sistema Terrestre

São José dos Campos, agosto de 2009

1. Introdução

Estudar as relações entre as atividades humanas e os sistemas naturais é fundamental para avançar nossa capacidade em produzir modelos cada vez mais realistas sobre as interações homem-natureza e seus impactos para a dinâmica do sistema terrestre. Neste contexto, as questões relacionadas às dinâmicas de uso e cobertura da terra têm destacada importância. A dinâmica de mudança da cobertura tem interações com as mudanças no clima que por sua vez impactam as localidades e comunidades em um processo contínuo e interligado. Estas dinâmicas são o resultado de uma complexa rede de interações entre os atores sociais envolvidos, cujas características, habilidades cognitivas e objetivos são altamente heterogêneos. Uma forma de explorar e buscar uma maior compreensão de processos de grande complexidade é o uso efetivo da modelagem computacional e simulação para observação e experimentação *in-silicium* das propriedades dinâmicas destes sistemas acoplados.

A Divisão Socio-Ambiental (DSA) do CCST tem como parte de sua missão o estudo destas dinâmicas para instrumentalizar os processos de construção de políticas públicas informadas, observando as questões das mudanças climáticas e ambientais no contexto do estado brasileiro, onde o desenvolvimento com justiça social é ainda essencial, e portanto a inclusão dos sistemas sociais nos modelos de apoio à decisão de políticas climáticas e ambientais é fundamental. Para isso, é necessário o estabelecimento de ferramentas computacionais que materializem um ambiente amplo, flexível e extensível para suporte à implementação e à simulação destes modelos complexos. Com o uso de ambientes computacionais integrados, pesquisadores podem focar no desenvolvimento do modelo em si, ao invés de se preocupar com as estruturas de dados e o controle da simulação. Além disso, ambientes integrados facilitam a interação dentro de equipes multidisciplinares, uma exigência cada vez maior da ciência moderna.

Entretanto, as iniciativas nesta direção no mundo são recentes, considerando ambientes computacionais integrados e fortemente acoplados a banco de dados geográficos. A grande maioria dos modelos de dinâmicas integradas entre sistemas sociais e naturais é implementada usando apenas os recursos disponibilizados diretamente por linguagens de programação, dedicadas a programadores profissionais, e não a modeladores. Esta situação dificulta o reuso e a interoperabilidade entre modelos. A DSA pode e deve se inserir neste nicho científico-tecnológico, com grande possibilidade de estabelecer o INPE como um ator global, como já o é nas questões climáticas.

O INPE possui um conjunto de experiências nesta direção, materializadas em alguns dos produtos baseados na biblioteca **TerraLib**. Estes produtos são desenvolvidos em conjunto com outras instituições, cujas relações precisam ser consolidadas e ampliadas. Adicionalmente, os produtos necessitam de inovações de forma a generalizar representações e atender a requisitos adicionais cada vez mais complexos. Minha proposta de trabalho está centrada nos dois aspectos do problema, o científico e o tecnológico, focando no desenvolvimento de novos modelos que usem

simulação computacional para estudar processos de mudança de uso e cobertura da terra e na construção das ferramentas que permitam esta modelagem e simulação. Estes objetivos estão detalhados nas próximas seções. As atividades de curto prazo (3 anos) estão divididas em Tecnológicas (Seção 2), Técnico-administrativas (Seção 3) e Científicas (Seção 4). As atividades de médio e longo prazo (5 e 10 anos, respectivamente) estão descritas na Seção 5.

2. Atividades Tecnológicas

As duas abordagens mais usadas para se estudar processos integrados com acoplamento entre sistemas sociais e as mudanças de uso e cobertura da terra são a estatística e a simulação computacional, comumente denominadas como *humans as clouds* e *humans as ants*, respectivamente. Ambas abordagens são importantes e complementares, visto que uma possui um maior rigor matemático, e a outra possibilita o relaxamento de fortes suposições dos modelos analíticos, como homogeneidade e racionalidade.

O principal objetivo das atividades tecnológicas é consolidar e ampliar o desenvolvimento de ferramentas computacionais de código aberto com o objetivo de fornecer suporte à implementação e simulação de modelos computacionais e sua simulação. Estas atividades estão concentradas em dois produtos da família **TerraLib**: o **aRT** e o **TerraME**, que trabalham com estatística e simulação computacional, respectivamente. O Objetivo é internalizar no CCST estas ferramentas que passarão a ser produtos sob responsabilidade do CCST em parceria com a DPI (**TerraLib**) e com outras instituições (LEG/UFPR para o **aRT** e TerraLab/UFOP para o **TerraME**).

2.1 aRT

O programa estatístico e de código aberto R (R Development Core Team 2004) tem se tornado cada vez mais uma linguagem padrão, tanto para os estatísticos quanto para os que necessitam de métodos que refletem o estado-da-arte da área. Citando apenas a estatística espacial, existem mais de cinquenta pacotes oficialmente registrados, vários deles contendo métodos inovadores propostos e publicados pelos próprios pesquisadores que desenvolvem os pacotes.

Em 2004, foi produzida a primeira versão do pacote **aRT** (API R-TerraLib), que integra o R à **TerraLib** (Andrade et al. 2005). O **aRT** tem origem no projeto SAUDAVEL, uma parceria entre o INPE e outros institutos e universidades, entre eles o **LEG (Laboratório de Estatística e Geoinformação)**, da Universidade Federal do Paraná (UFPR), onde ocorreu o seu desenvolvimento. O pacote disponibiliza uma interface simples para a troca de dados e o acesso a funções de geoprocessamento que podem servir como base para análises estatísticas complexas. Atualmente, ele é usado para se desenvolver um sistema de alerta para epidemias de dengue no Recife, além de servir como interface para análise estatística de processos de mudança de uso e cobertura da terra na Amazônia.

Os objetivos com relação ao aRT para os próximos três anos são:

- 1) Estabelecer o **aRT** internamente no CCST.
- 2) Realizar atualizações do pacote de acordo com a disponibilização de novas versões dos programas dos quais ele depende, de forma a atender às demandas internas e externas ao INPE necessárias para a criação dos modelos. As novas versões serão multiplataforma (Windows e Linux), e a sua distribuição será feita em parceria com o LEG.
- 3) Produzir material didático de treinamento e capacitação, bem como ministrar cursos anuais.

2.2 TerraME

O **Terra Modelling Environment (TerraME)** é um ambiente de desenvolvimento de modelos espaciais dinâmicos, originalmente resultante da Tese de Doutorado de Tiago Carneiro, defendida no INPE (Carneiro 2006), e sendo hoje o produto da família **TerraLib** para modelagem e simulação. Este ambiente computacional tem por objetivo fornecer um ferramental para o apoio ao desenvolvimento e à simulação de modelos acoplados dos sistemas sociais e naturais. O desenvolvimento do **TerraME** iniciou-se em 2002, e em 2006 foi criado o **TerraLAB (Laboratório Associado para Modelagem e Simulação de Sistemas Terrestres)**, fruto de uma parceria entre INPE e a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), onde ocorre o atual desenvolvimento do **TerraME**.

As atividades referentes ao **TerraME** envolvem dois aspectos principais:

- 1) Construção político-institucional do **TerraME** como um produto CCST-UFOP, internalizando no INPE e garantindo assim sua continuidade.
- 2) Consolidação e ampliação das inovações necessárias do ambiente **TerraME**, em particular a sua extensão para modelagem baseada em agentes.

As atividades relacionadas a estes dois aspectos são apresentadas a seguir.

Construção do TerraME como um produto CCST-UFOP

- 1) Ser o responsável pela relação direta com Tiago Carneiro-**TerraLAB** para a manutenção, distribuição e desenvolvimento das futuras versões do **TerraME**;
- 2) Manter a consistência necessária para o funcionamento do **TerraME** multiplataforma (Windows e Linux), com as novas versões da **TerraLib** a serem lançadas entre outubro deste ano e dezembro de 2011, interagindo com a equipe **TerraLib** da DPI/INPE.
- 3) Oficializar, como atividade conjunta **INPE-TerraLAB/UFOP**, a criação de um repositório CVS no INPE para o **TerraME**, de forma a funcionar como espelho do repositório da UFOP, que contem o *kernel* e demais elementos do ambiente.

Consolidar e ampliar as inovações no ambiente TerraME

- 1) Implementar uma extensão em **TerraME** que possibilite a modelagem baseada em agentes (*agent-based modelling* – ABM). A especificação dos elementos necessários para esta extensão já foi proposta anteriormente (Andrade 2007; Andrade et al. 2008).
- 2) Desenvolver uma extensão em **TerraME** para se permitir a visualização dinâmica dos modelos em tempo de execução. Atualmente, é necessário que o usuário salve os resultados em um banco de dados espacial durante a simulação, de forma que a visualização dos mesmos só é possível após o final da simulação.
- 3) Desenvolver estratégia única para acoplamento entre diferentes partes de um modelo e diferentes modelos. Atualmente o **TerraME** possui implementações independentes para realizar o acoplamento entre múltiplas escalas e entre agentes e espaço geográfico (Andrade et al. 2008; Moreira et al. 2008). O objetivo é generalizar estas conexões usando apenas uma única implementação válida para todos os casos.
- 4) Transformar o *kernel* do **TerraME** em um *kernel* distribuído, para trabalhar em arquitetura *cluster* HPC (*High-Performance Computing*), de forma a poder aproveitar todo o potencial computacional a ser disponibilizado no laboratório **TerraME-Galileu** (ver Seção 3).
- 5) Produzir material didático, elaborar um curso de curta duração e ministrar cursos anuais de treinamento e capacitação.
- 6) Publicar dois artigos científicos em periódicos internacionais com corpo editorial sobre o ambiente.
- 7) Organizar três reuniões técnicas por ano entre INPE e UFOP para discussão de futuras versões do **TerraME**.

3. Atividades Técnico-administrativas

Inicialmente, são propostas duas atividades técnico-administrativas:

- 1) Ser co-responsável pelo estabelecimento do **TerraME-Galileu**, um laboratório de Computação de Alto Desempenho para pesquisa e desenvolvimento em modelagem de mudanças ambientais integrada e a análise de seus impactos sociais e econômicos. O laboratório está ligado ao projeto **Galileu**, uma Rede Temática em Computação Científica e Visualização financiada pela Petrobras, sob coordenação de Antônio Miguel Vieira Monteiro;
- 2) Participar ativamente do Grupo Técnico de Tecnologia da Informação do CCST (GT-TI-CCST).

4. Atividades Científicas

Atualmente, estou na fase final do desenvolvimento da minha tese de doutorado em Computação Aplicada (CAP/INPE), orientado pelos professores Antônio Miguel Vieira Monteiro e Gilberto Câmara. O prazo final oficial para o término é março de 2011, mas pretendo defender até agosto de 2010. Tenho explorado duas áreas de pesquisas interligadas e tenho produzido nestas áreas, descritas a seguir.

Área 1 – Ambientes Computacionais integrados para Modelagem de Dinâmicas Complexas com Interação Espacial

A primeira linha de trabalho se concentra no desenvolvimento de uma abordagem conceitual geral e da produção de ferramentas para modelar e simular sistemas sociais usando dados geográficos reais para alimentar as entidades e os relacionamentos que compõem modelos baseados em agentes. As ferramentas disponíveis na literatura não possuem uma abordagem geral, limitando-se ao suporte de conjuntos limitados de relações. O trabalho tem por hipótese que a idéia de Matriz de Vizinhaça Generalizada (*Generalized Proximity Matrix – GPM*) (Aguiar et al. 2003) é uma abordagem geral para o estabelecimento de todas as possíveis relações. Atualmente, estou em fase de implementação da extensão para o **TerraME** de forma a possibilitar o uso destas relações. Após a implementação, serão desenvolvidos estudos de caso baseados em artigos já publicados em periódicos internacionais. A produção acadêmica desta área é composta de dois artigos:

- P. R. Andrade, A. M. V. Monteiro, G. Camara, T. G. S. Carneiro. **An Architecture for Agent-based Modelling and Simulation of Geospatial Phenomena.** *6th European Social Simulation Association Conference (ESSA'09)*. Guildford, Inglaterra. Set/09. (aceito como resumo estendido)
- P. R. Andrade, A. M. V. Monteiro, G. Camara. **Entities and Relations for Agent-Based Modelling of Complex Spatial Systems.** I Brazilian Workshop on Social Simulation (BWSS/SBIA). Em *Proceedings of 1st Brazilian Workshop on Social Simulation*, pp. 52-63. Salvador-BA. Out/2008.

Área 2 – Simulação de Sistemas Sociais: Teoria dos Jogos como Estratégias Comportamentais em Modelos Baseados em Agentes em Espaços Celulares

A segunda linha de trabalho propõe novos modelos teóricos para estudar competições por espaço, usando técnicas da Teoria de Jogos e modelagem baseada em agentes. Os resultados do trabalho mostram que os pontos de equilíbrio teóricos não são necessariamente os pontos de equilíbrio obtidos por uma população que compete por espaço, mas existe uma correlação entre os dois.

Na última etapa do trabalho, tenho como objetivo usar estas duas abordagens para tentar capturar algumas das dinâmicas de uso da terra na Amazônia. Os modelos atuais da literatura computam a mudança de uso ou cobertura de uma célula baseado apenas em análises estatísticas. O objetivo é fazer emergir a mudança de uso baseando-se no comportamento de agentes individuais e suas interações. A produção acadêmica desta área também é composta de dois artigos:

P. R. Andrade, A. M. V. Monteiro, G. Camara. **Games on Cellular Spaces: An Evolutionary Approach**. Em L. S. Lopes, N. Lau, P. Mariano, L. Rocha. *Progress in Artificial Intelligence, 14th Portuguese Conference on Artificial Intelligence, EPIA 2009*. Aveiro, Portugal. Out/09. (aceito para publicação)

P. R. Andrade, A. M. V. Monteiro, G. Camara, S. Sandri. **Games on Cellular Spaces: How Mobility Affects Equilibrium**. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)*. 12(1) p. 5. Jan/2009.

Após o término do doutorado, três atividades são propostas para dar continuidade às atividades científicas:

- 1) Organizar um *workshop* da Área 2 (Simulação de Sistemas Sociais) no INPE, com o intuito de integrar os parceiros nacionais e envolvê-los com as questões da simulação social voltadas para as mudanças climáticas e ambientais. Também tenho como objetivo deste *workshop* desenvolver novas parcerias internas e externas.
- 2) Trabalhar com redes complexas e modelagem baseada em agentes no estudo de sistemas sociais integrados a sistemas naturais. O objetivo é entender como diferentes propriedades de redes de conexões entre os atores envolvidos podem afetar o desenvolvimento de processos que ocorrem no espaço geográfico. Estes estudos estão sendo realizados como parte das atividades de um grupo de pesquisa em redes complexas denominado **GeoCxNets**, envolvendo pesquisadores e alunos da DPI e do CCST.
- 3) Colaborar com o programa de pós-graduação do CCST.

Cronograma das atividades de curto prazo¹

Atividade	1º ano	2º ano	3º ano
Doutorado CAP	■	■	
Espelho INPE com CVS para o TerraME	■		
Material didático e elaboração de curso aRT	■		
Material didático e elaboração de curso TerraME		■	
Modelo LUCC com Teoria de Jogos (preliminar)		■	■
Extensão para ABM no TerraME		■	■
Estratégia única de acoplamento		■	■
Visualização dinâmica de modelos		■	■
<i>Kernel TerraME</i> distribuído		■	■
Artigos em periódico (2)		■	■

5. Perspectivas para médio e longo prazo (5 a 10 anos)

O objetivo tecnológico para médio prazo (5 anos) é focar no desenvolvimento conjunto de modelos integrados com o uso do **TerraME** e do **aRT**, trabalhando com pesquisadores que desenvolvem modelos do sistema natural, de forma a integrar estes com modelos sócio-econômicos. Este trabalho poderá gerar novas demandas para as ferramentas, que precisarão ser atualizadas e então usadas pelos usuários novamente, perfazendo o ciclo necessário para a evolução de qualquer ferramenta computacional.

No plano científico, a perspectiva é trabalhar com avanços teóricos e conceituais no uso de Teoria de Jogos para representação de estratégias computacionais em modelos baseados em agentes distribuídos, trabalhando com a inserção de aspectos econômicos, tais como a modelagem de cadeias econômicas e de mercados de terra, analisando os seus possíveis impactos nos processos de mudança de uso e cobertura da terra. Adicionalmente, os estudos integrando as técnicas de redes complexas ao ambiente **TerraME** permitirão desenvolver modelos ainda mais complexos, possibilitando incorporar, por exemplo, a cadeia do bife e a cadeia do Açai no Pará, ou a cadeia do biodiesel em escala nacional, assim como estudos de formação de cidades e espaços urbanos na Amazônia.

¹Neste cronograma não aparecem as atividades recorrentes, como ministrar cursos anuais, organizar reuniões técnicas do **TerraME** e gerar novas versões atualizadas dos *softwares*. As atividades técnico-administrativas perdurarão durante os três anos e também não são descritas neste cronograma.

As atividades acima descritas serão desenvolvidas junto à Divisão de Sistemas Sócio-Ambientais do CCST, divisão esta sediada no INPE de São José dos Campos.

Concordo em contribuir com os programas de Pós-Graduação do INPE, especialmente o novo programa de doutorado em Ciência do Sistema Terrestre, tanto no sentido de preparar e ministrar disciplinas, como o de orientar alunos.

Assumo o compromisso de manter produção científica de alto nível e disseminar os resultados de pesquisa em periódicos de circulação internacional e alto impacto, tendo como meta a produção média de duas publicações em três anos, sendo primeiro autor em uma delas. O não cumprimento desta meta deverá ser justificado.

Assumo o compromisso de manter e evoluir o produto de modelagem integrada TerraME com pelo menos o lançamento de uma versão anual durante os próximos três anos, mantendo a consistência e adequação da documentação deste produto de software.

Concordo que devo cumprir os horários de trabalho estabelecidos pelo INPE para todos os seus funcionários. Finalmente, concordo que o INPE pode, a qualquer momento, alterar este plano de trabalho dentro de suas prioridades institucionais.

São Jose dos Campos, 7 de agosto de 2009.

Pedro Ribeiro de Andrade Neto

De acordo:

Carlos Afonso Nobre
Chefe do CCST-INPE

Referências bibliográficas

- Aguiar, A. P. D., Câmara, G., and Cartaxo, R. (2003), 'Modeling Spatial Relations by Generalized Proximity Matrices', *V Brazilian Symposium in Geoinformatics - GeoInfo 2003* (Campos do Jordão, SP, Brazil).
- Andrade, P. R. (2007), 'A Comparative Analysis of Agent-based Modelling Toolkits', *Monografia de qualificação de doutorado* (Sao Jose dos Campos: INPE).
- Andrade, P. R., Ribeiro Jr, P. J., and Fook, K. (2005), 'Integration of Statistics and Geographic Information Systems: the R/TerraLib case', paper given at VII Brazilian Symposium on GeoInformatics - GEOINFO 2005, Campos do Jordão, Brazil.
- Andrade, P. R., Monteiro, A. M. V., and Camara, G. (2008), 'Entities and Relations for Agent-based Modelling of Complex Spatial Systems', *I Brazilian Workshop on Social Simulation (BWSS'08)* (Salvador, Brazil), 52-63.
- Carneiro, T. G. S. (2006), 'Nested-CA: a foundation for multiscale modeling of land use and land change', (INPE).
- Moreira, E., et al. (2008), 'Spatial relations across scales in land change models', *X Brazilian Symposium on Geoinformatics - GEOINFO 2008* (Rio de Janeiro, Brazil).
- R Development Core Team (2004), *R: A language and environment for statistical computing* (Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing).