

MODELAGEM DA ESTRUTURA E DA ARQUITETURA DE ERVA-MATE

MIROSLAVA RAKOCEVIC¹

ADRIANO FRANZONI OTAVIAN²

EDUARDO DELGADO ASSAD³

SÔNIA TERNES⁴

ÉERICA VITÓRIA PICARELLI⁵

SÍLVIO ROBERTO DE MEDEIROS EVANGELISTA⁶

RESUMO: A arquitetura vegetal permite representar mais realisticamente as interações da planta com seu ambiente, minimizando a ocorrência de fracassos nos estudos que assumem um comportamento biológico baseado em estimativas médias. A modelagem de arquitetura vegetal é uma área de pesquisa nova e promissora na América do Sul. Este trabalho tem como objetivos apresentar os conceitos básicos envolvidos na modelagem da estrutura e da arquitetura de plantas, e relatar as pesquisas em desenvolvimento sobre a análise da estrutura de crescimento da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). No ciclo anual da erva-mate apresentam-se regularmente duas pausas no crescimento que separam as brotações anuais em duas unidades de crescimento (GU) sucessivas. No experimento em campo com 30 plantas adultas foram medidos os parâmetros morfológicos durante dois anos (período entre duas podas). O desenvolvimento arquitetural das plantas está sendo analisado em várias escalas, com o uso do sistema computacional francês denominado AMAPmod. Características não medidas nas plantas adultas, como o padrão de ramificações, foram obtidas em um experimento realizado com plantas jovens. Atualmente estão sendo construídos histogramas e seqüências dos metâmeros das GU's presentes nos eixos principais das plantas adultas, visando determinar o padrão de crescimento caulinar da erva-mate. Espera-se que a codificação dos ramos das plantas jovens contribua para a obtenção do modelo de desenvolvimento topológico. Esse modelo permitirá observar as caracterizações locais (posição de entrenós) e globais (comprimento de ramos) da espécie. A reconstrução de plantas em 3D considera as inclinações e o azimute de ramos e de componentes foliares recuperados a partir de fotografias, incluindo a diferenciação sexual das plantas.

PALAVRAS CHAVE: arquitetura 3D, crescimento de caule, entrenós, metâmeros, mesotonia, ramificação.

STRUCTURAL AND ARCHITECTURAL MODELING OF YERBA-MATE

ABSTRACT: The plant architecture allows to represent the interactions between plant and its environment in a more realistic way, minimizing the impact of failure that occurs in studies of biological phenomena based on estimation on averages. Plant architecture modeling is a new and promising research area in South America. The general objectives of this paper are to show the basic concepts involved on plant structure and architecture, and to mention the research process about the analysis of growth and structure of yerba-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). Two growth pauses

¹ Engenheira Agrônoma, Doutora, Pesquisadora Visitante da FAPESP na Embrapa Informática Agropecuária, e-mail: mima@cnptia.embrapa.br

² Engenheiro de Computação, Bacharel, Embrapa Informática Agropecuária, e-mail: adriano@cnptia.embrapa.br

³ Engenheiro Agrícola, Doutor, Embrapa Informática Agropecuária, e-mail: assad@cnptia.embrapa.br

⁴ Matemática Aplicada, Doutora, Embrapa Informática Agropecuária, e-mail: sonia@cnptia.embrapa.br

⁵ Graduanda em Estatística, UNICAMP, estagiária na Embrapa Informática Agropecuária, e-mail: erica@cnptia.embrapa.br

⁶ Estatístico, Doutor, Embrapa Informática Agropecuária, e-mail: silvio@cnptia.embrapa.br

regularly appear each year in yerba-mate, which separate each annual shoot into two successive growth units (GUs). Morphological parameters were measured in a field during two years (period between two successive prunings) in thirty adult plants. The architectural development is analyzing applying French program for structural modeling – AMAPmod - in several scales. The missing experimental data (related to a branching pattern) are attributed based on an another experiment conducted on seedlings. The histograms and sequences constructed for metamer distribution on GUs from principal axes and ramifications in adult plants are expected to show the shoot growth pattern. Sequenced branches of yerba seedlings are expected to contribute to a model of topological development, considering local (position of internodes) and global (branch lengths) characteristics. The 3D plant reconstruction includes inclinations and azimuths of branches and leaf components recuperated from plant photographs and will tend to distinct plants of two sexes.

KEY-WORDS: 3D architecture, branching, internodes, mesotony, metamers, shoot growth.

1. INTRODUÇÃO

O termo arquitetura vegetal considera “qualquer descrição individual baseada na decomposição de plantas em componentes, especificando o seu tipo biológico, sua forma, sua localização/orientação no espaço e a maneira como eles são fisicamente relacionados uns aos outros” (GODIN, 2000). De acordo com essa definição, a representação da arquitetura de plantas requer: informação sobre a decomposição da planta, explicitando seus diferentes componentes e tipos; informação geométrica, descrevendo as formas e posição espacial dos componentes; e informação topológica, descrevendo o modo como os componentes são conectados uns aos outros. Estes três tipos de informações podem ser combinados criando descrições mais complexas (GODIN *et al.*, 1999).

Até a década de setenta, os desenhos botânicos foram o único meio de representar a arquitetura de plantas. O uso de computação de alta performance acelerou o desenvolvimento de várias representações formais e diversas noções de arquitetura de plantas (*string* de caracteres, árvores de eixos, grafos em árvores, grafos multi-escalares, *linked-list* de registros, matrizes, fractais, conjuntos de pontos digitalizados).

A representação da estrutura vegetal pode ser utilizada na análise arquitetural (COSTES & GUÉDON, 2002) ou para um melhor entendimento do funcionamento das plantas, como alocação de carbono (KURTH & SLOBODA, 1997), transporte de água nas raízes (CHOPARD, 2004), interação entre as plantas e seus órgãos com o micro-ambiente (BASSETTE & BUSSIÈRE, 2005, SALAS *et al.*, 2004), mecânica de madeira, ecologia, produção e crescimento de plantas (MEREDIEU *et al.*, 2004), desenvolvimento e modelos visuais. A combinação entre os modelos baseados nos processos e os modelos geométricos foi chamada por SIEVÄNEN *et al.* (2000) como modelagem funcional - estrutural (FSM). Em geral, FSM's simulam o crescimento de plantas considerando a interação entre a arquitetura vegetal, micro- e filo-clima (CHELLE *et al.*, 2005) e os processos fisiológicos.

A coleta de dados para a obtenção da arquitetura é um problema complexo e trabalhoso. Hoje em dia é possível digitalizar a planta para auxiliar a análise quantitativa da interação das plantas com o ambiente. Muitos sistemas de digitalização não são práticos no trabalho com as plantas, até são limitados, considerando que as folhas e ramos apresentam uma linha obscura na visão do observador. Os marcadores de crescimento, ou seja, nós, escamas, pausas de crescimento, ramificações etc, representam os traços marcantes na interpretação da história de crescimento de um vegetal. Em certos casos é possível seguir a cronologia da emissão de entidades botânicas consecutivas, graças aos marcadores de crescimento. Novas oportunidades foram abertas com a possibilidade de escanear e digitalizar as plantas em 3D (por exemplo, com Polhemus Fastrack – GODIN *et al.*, 1999), com os

métodos de tomografia (KOLESIK *et al.*, 2004), GPS (global positioning systems), GIS (geographic information systems) e realidade virtual (VR) em diferentes escalas: de nano-escala que considera a estrutura do DNA e as interações entre proteínas, na escala de células (de REUILLE *et al.*, 2005), até a macro-escala de efeitos de tempo e clima nas comunidades de plantas e de migração de animais (HANAN *et al.*, 2002).

A arquitetura de plantas está sendo estudada nos últimos vinte anos em diferentes laboratórios espalhados no mundo, com exceção da América do Sul. Três núcleos mais importantes da pesquisa na área de arquitetura de plantas situam-se em: 1) CIRAD (Montpellier) e INRA (alguns centros) da França que desenvolveram o programa AMAP (hoje se encontra em continuação sob o nome Vplants sob a plataforma OpenAlea, disponibilizado gratuitamente no site <http://www.sop.inria.fr/virtualplants/wiki/doku.php?id=software>.); 2) Algorithmic Botany em Calgary (Canadá) desenvolvendo softwares ambientais para modelagem 3D, baseados na linguagem L-sistema para representar a estrutura de plantas (PRUSINKIEWICZ & LINDERMAYER, 2004) e 3) CPAI da Universidade de Queensland e CSIRO Austrália, que permite a descrição do comportamento de sistemas dinâmicos em forma de algoritmos fundamentados no L-sistema.

O AMAPmod contempla modelos matemáticos e estatísticos (no STAT módulo) para identificar e caracterizar as leis de edificação estrutural vegetal, a partir de dados apresentados em estrutura de grafo de árvore multiescalar (*multiscale tree graph* - MTG). Entre as escolas principais de modelagem da arquitetura vegetal, esse software se mostrou mais adequado na obtenção de respostas matemático-biológicas complexas. A outra ferramenta - L-sistema – oferece uma ótima reconstrução gráfica e boa simulação da interação vegetal com o ambiente. Porém, nessas simulações, o usuário deve incluir as leis matemáticas sobre o crescimento vegetal para cada nova pesquisa. Os módulos estatístico-matemáticos de análise de crescimento e interação de plantas com o ambiente, desenvolvidos na solução de problemas específicos, podem ser acoplados pelo usuário ao AMAPmod e disponibilizados através da plataforma aberta OpenAlea para toda a comunidade de pesquisadores. Um dos objetivos do grupo de estudos em modelagem de arquitetura de plantas da Embrapa Informática Agropecuária é detectar no AMAPmod os limites do crescimento vegetal reduzido acoplados a séries temporais de dados meteorológicos.

Para iniciar o trabalho no Brasil, escolheu-se a erva-mate (*Ilex paraguariensis*, St. Hil.), uma espécie arbórea, sempre verde, dióica, nativa da América do Sul, da qual possuímos dados relativamente precisos sobre sua morfogênese. RAKOCEVIC *et al.* (2006a) observaram que o crescimento da erva-mate apresenta uma combinação de extensão e ramificação monopodial e pseudo-simpodial. Foram determinadas duas ondas no crescimento anual da erva-mate, uma na primavera e outra no outono (BAZZO & RAKOCEVIC, 2005). No campo, apresentam-se regularmente duas pausas de crescimento, uma de verão (total ou parcial) provavelmente relacionada ao fotoperíodo, e outra de inverno aparentemente provocada pelas temperaturas mínimas baixas induzindo dormência. As plantas apresentam marcadores de crescimento nos caules reconhecidos pelo agrupamento de ramificações e pelos entrenós extremamente curtos que seguem este agrupamento, encontrando-se no limiar entre duas unidades de crescimento anual (RAKOCEVIC *et al.*, 2006a).

Devido ao conhecimento relativamente restrito sobre a botânica e a ecologia dessa espécie sul-americana, foram iniciadas múltiplas análises no programa AMAPmod com os objetivos específicos de: 1) entender e determinar o padrão de crescimento caulinar da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.); 2) definir o gradiente de vigor de ramificação e o padrão fundamental de ramificações (basitonía, mesotonía e acrotonía) e 3) reconstruir as plantas adultas e jovens em três dimensões.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Trinta plantas adultas de erva-mate de quatro anos de idade foram identificadas em março de 2003 em dois ambientes de cultivo distintos (monocultura e floresta primária antropizada) em Barão de Cotegipe, RS, e podadas em abril do mesmo ano. Três gemas foram marcadas (com etiquetas plásticas) em cada planta e o crescimento relacionado ao eixo principal (EP) foi observado durante dois anos, entre duas podas consecutivas. Durante dois anos (julho 2003 – junho 2005) foram realizadas 38 medições da quantidade e do comprimento de cada entrenó (EN) no EP, além da superfície de cada folíolo. O crescimento de ramificações de primeira e segunda ordem foi medido somente nas 17 primeiras observações.

Para a análise dos dados no AMAPmod foi criado um MTG geral para as 30 plantas (planilha contendo mais que 200.000 linhas no total) representando seus entrenós e unidades de crescimento nos eixos principais, com os respectivos atributos. Os MTG's mais específicos de erva-mate estão sendo trabalhados para se estimar as ramificações de plantas adultas análogas ao experimento desenvolvido com plantas jovens (BAZZO & RAKOCEVIC, 2005).

A análise seqüencial de entrenós e a probabilidade de ocorrência de ramificações definirá o padrão de ramificações da erva-mate, enquanto distribuições e comparações de histogramas definirão o padrão de crescimento separado pelas unidades de crescimento (GUs).

3. RESULTADOS ESPERADOS

Teoricamente, o crescimento das unidades de crescimento é o resultado de dois componentes: ontogênico (que descreve o desenvolvimento progressivo da planta desde o nascimento até a morte) e climático (externo). A questão aberta é como o componente ontogênico influencia a tendência de sucessão de fases ao longo de um eixo, no nível de brotação anual ou de unidade de crescimento. Isso porque durante a ontogênese, as mudanças das características morfológicas das entidades vegetais, tais como as brotações anuais ou as GUs, são interpretadas como efeito indireto de meristemas, os quais se encontram em diferentes estágios fisiológicos. Desta maneira, as entidades vegetais conectadas podem exibir características similares ou contrárias. O AMAPmod contempla modelos matemáticos e estatísticos para identificar e caracterizar as zonas homogêneas e as transições entre zonas nos dados em estrutura de árvore. O modelo que pretendemos utilizar é baseado na “árvore oculta de Markov” (Hidden Markov Tree - HMT) e no agrupamento (*clustering*) de entidades vegetais em classes que representam um mesmo estágio fisiológico. Atualmente está sendo construído um MTG a partir das observações que representam as primeiras duas unidades de crescimento (coincidentes com 17^a-20^a observação). Pretende-se testar no AMAPmod as seguintes hipóteses: 1) o crescimento das entidades vegetais nas ramificações de primeira e segunda ordem correspondem ao crescimento prévio do eixo principal, ou 2) o crescimento das entidades vegetais nas ramificações de primeira e segunda ordem correspondem ao crescimento do eixo principal formado durante o crescimento atual de ramificações (simultaneamente ao crescimento de EP).

O gradiente fundamental de vigor (basitonia, mesotonia e acrotonia) ainda não foi definido na literatura para essa espécie. Esperamos observar a mesotonia como gradiente fundamental. Porém, pode ocorrer uma coincidência de diferentes padrões de ramificações na população de plantas pesquisadas, ou numa mesma planta considerando outra ordem de ramificação ou unidade de crescimento, devido a grande variabilidade na espécie e estratégias de ocupação de espaço.

Pretende-se reconstruir em 3D duas plantas de cada ambiente de cultivo (monocultura e floresta antropizada), uma de cada sexo, devido à expressão de dimorfismo sexual (RAKOCEVIC *et al.*,

2006b) praticamente não conhecido nas plantas nos estágios vegetativos e dificilmente percebido visualmente.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASSETTE, C.; BUSSIÈRE, F. 3-D modeling of the banana architecture for simulation of rainfall interception parameters. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 129, n. 1-2, p. 95-100, March 2005.
- BAZZO, K. C. DE AND RAKOCEVIC, M. Periodicidade no crescimento vegetativo de *Ilex paraguariensis* (St. Hil) Aquifoliaceae. **Série Documentos da Embrapa Florestas** 117, CD-ROM. 2005.
- CHELLE, M. Phylloclimate or the climate perceived by individual plant organs: What is it? How to model it? What for? **New Phytologist**, v. 166, p. 781–790, 2005.
- CHOPARD, J. 3D modeling of water transfers in soil and roots systems. **In: 4TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON FUNCTIONAL-STRUCTURAL PLANT MODELS. Anais...**, p. 154-158, Montpellier, France, 7-11 June 2004.
- COSTES, E.; GUÉDON Y. Modeling branching patterns on 1-year-old trunks of six apple cultivars. **Annals of Botany**, v. 89, n.5, p. 513-524, 2002.
- GODIN C., COSTES E., SINOQUET H. A plant architecture description method integrating topology and geometry, **Annals of Botany**, v. 84, p. 343-357, 1999.
- GODIN, C. 2000. Representing and encoding plant architecture: a review. **Annals of Forest Science**, v. 57, n. 5, p. 413-438.
- HANAN, J., PRUSINKIEWICZ, P.; ZALUCKI, M., SKIRVIN D. Simulation of insect movement with respect to plant architecture and morphogenesis. **Computers and Electronics in Agriculture** 35: 255–269, 2002.
- KOLESIK, P.; FOUARD, C.; PROHASKA, S.; MCNEILL A. Automated method for non-destructive 3D visualization of plant root architecture using X-ray tomography. **In: 4TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON FUNCTIONAL-STRUCTURAL PLANT MODELS. Anais...**, p. 27, Montpellier, France, 7-11 June 2004.
- KURTH, W.; SLOBODA, B. Growth grammars simulating trees - an extension of L-systems incorporating local variables and sensitivity. **Silva Fennica**, v. 31, p. 285—295, 1997.
- MEREDIEU, C; CARAGLIO, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; COLIGNY, F. DE; BARCZI, J.F. The advantages of coupling stand description from growth models to tree description from architectural models. **In: 4TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON FUNCTIONAL-STRUCTURAL PLANT MODELS. Anais...**, p. 243-247, Montpellier, France, 7-11 June 2004.
- PRUSINKIEWICZ, P.; LINDENMAYER, A. **The algorithmic beauty of plants**, Springer Verlag, New York, 2004, electronic version, 220 p.
- RAKOCEVIC, M.; MEDRADO, M. J. S.; LUCAMBIO, F.; VALDUGA, T. A. Shoot growing characterization in yerba-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) cultivated in two contrasting light environments. **In: 4TH SOUTH - AMERICAN CONGRESS IN YERBA-MATE. Anais...** Pousadas, Argentina, p. 244-249, November, 5th - 8th, 2006a.
- RAKOCEVIC, M.; MEDRADO, M. J. S.; LUCAMBIO, F.; VALDUGA, T. A. Ritmicidade de emissão e de queda de folhas e as suas conseqüências no manejo da erva-mate **In: 4TH SOUTH - AMERICAN CONGRESS IN YERBA-MATE. Anais...** Pousadas, Argentina, p. 250-256, November, 5th - 8th, 2006b.
- REUILLE, P. B. DE; BOHN-COURSEAU, L.; GODIN, C.; TRAAS J. A protocol to analyse cellular dynamics during plant development. **The Plant Journal**, v. 44, p.1045–1053, 2005.
- SALAS, E.; OZIER-LAFONTAINE, H.; NYGREN, P. A fractal root model applied for estimating the root biomass and architecture in two tropical legume tree species **Annals of Forest Science**, v. 61 p. 337–345, 2004.
- SIEVÄNEN, R.; NIKINMAA, E.; NYGREN, P.; OZIER-LAFONTAINE, H.; PERTTUNEN, J.; HAKULA, H. Components of functional-structure tree models. **Annals of Forest Science**, v. 57, p. 399-412, 2000.