

AmostraCafe3D – SOFTWARE PARA INCLUSÃO DE INFORMAÇÕES NA ESCALA DE METÂMEROS EM EIXOS PLAGIOTRÓPICOS PARCIALMENTE CODIFICADOS¹

Miroslava Rakocevic², Jonas Barbosa Tosti³; Fabio Takeshi Matsunaga⁴

¹ Trabalho financiado pelo Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – Consórcio Pesquisa Café

² Bolsista Consórcio Pesquisa Café, DSc, IAPAR, Londrina-PR, miroslava@iapar.br

³ Bolsista PIBIC no IAPAR, aluno de Ciências de Computação, UEL, Londrina-PR, jonastostii@gmail.com

⁴ Bolsista CAPES, mestrado em Ciências de Computação, UEL, Londrina-PR, ftakematsu@gmail.com

RESUMO: Café arábica (*Coffea arabica* L.) tem o crescimento contínuo; a sua arquitetura segue o modelo de Roux que é definido pela diferenciação geométrica e funcional entre o tronco principal – ortotrópico e os eixos laterais – plagiotrópicos. As medições de arquitetura de cafeeiros estão sendo feitas através de amostragem. O eixo principal é sempre descrito na escala de metâmeros, enquanto se amostram quatro eixos plagiotrópicos de 2ª ordem de ramificação (orientados para quatro pontos cardeais) em cada estrato do perfil vertical, a cada 40 cm. Nesses eixos realiza-se codificação completa na escala de metâmeros, mais a descrição detalhada das suas ramificações laterais de 3ª a 5ª ordem. Todos os outros ramos plagiotrópicos de 2ª ordem foram descritos pela sua posição ao longo de eixo ortotrópico, seu comprimento total, número de frutos e orientação cardinal. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um software (AmostraCafe3D) auxiliar a VPlants, para inclusão de informações na escala de metâmeros em eixos parcialmente codificados, considerando interpolação, proporcionalidade e probabilidade de ocorrência de eventos botânicos. Plantas foram codificadas em objetos matemáticos hierarquizados que apresentam topologia e geometria de plantas (MTG). As saídas do software são MTGs de entrada enriquecidos com as informações incluídas após a computação. AmostraCafe3D considera duas situações: 1) não houve nenhuma observação temporal precedente e 2) existiram observações precedentes dos mesmos indivíduos. A lógica de inclusão de informações em eixos parcialmente medidos é baseada nos eixos completamente medidos do estrato e da orientação procurada em todas as plantas. O comprimento de cada entrenó é estimado como média referente ao seu índice. A probabilidade de presença de folhas e ramificações em cada metâmero é baseada na ocorrência deste evento em eixos medidos e distribuída em eixos reconstruídos com algoritmo randômico. A distribuição de frutos ajustou-se através da interpolação linear e a de Lagrange. A validação do modelo desenvolvido deu-se por comparação de área foliar formada pelos estratos de perfil vertical de cafeeiros completamente codificados de cv. IAPAR 59 com as maquetes geradas pelo AmostraCafe3D. Atualmente, o software produz as reconstruções com uma fraca superestimação de área foliar, melhor estimada em camadas de 40 cm do que em plantas inteiras.

PALAVRAS-CHAVE: algoritmo randômico, área foliar, arquitetura de plantas, Python, eixos plagiotrópicos.

AmostraCafe3D – SOFTWARE FOR INCLUSION OF MISSED DATA ON METAMER SCALE TO THE PARTIALLY MEASURED BRANCHES

ABSTRACT: Arabica coffee plants (*Coffea arabica* L.) are characterized by their continuous growth and architecture described by Roux's model, which is defined by geometrical and functional differentiations between the main orthotropic axis and the lateral plagiotropic branches. In the current study, measurements of coffee architecture were performed by sampling. The main axis was codified using a metamer scale, while four 2nd order plagiotropic branches were sampled (each oriented to one cardinal point) to represent each 40 cm-thick layer along the vertical tree profile. These sampled 2nd order plagiotropic branches were codified on the metamer scale plus the detailed description of their lateral plagiotropic branches of 3rd to 5th order. All other 2nd order plagiotropic branches were defined by their position along the orthotropic axis, total branch length, berry number and the cardinal orientation. The aim of this work was to develop auxiliary software (AmostraCafe3D) to VPlants, for the inclusion of data at metamer scale in partially codified plagiotropic axis, considering interpolation, proportionality and occurrence probability of botanical events. The plants are codified in mathematical hierarchized objects that represent plant topology and geometry (MTG). The software outputs are the input MTG enriched with computed information for plant reconstruction. AmostraCafe3D considers two situations: 1) no previous temporal observation, and 2) previous observations of the same coffee plants. The logic of data inclusion in a partially measured axis is based on information from all axes with approximately similar cardinal orientation that were completely described in the given layer. The length of each internode was estimated as an average value referent to its index. The probability of branching and leaf presence at each metamer was determined by occurrences of this event on the measured axis and was distributed on the reconstructed plagiotropic axis by computing with a randomized algorithm. The berry distribution on plagiotropic axes was fitted with linear and Lagrange interpolations. Validation of the developed model was performed by the comparison of the leaf area formed in layers by vertical profile of cv. IAPAR 59 coffee plants, which were completely measured and the leaf area of mock-ups computed by the AmostraCafe3D software. At current, the software produces reconstructions that have a slight overestimation of the leaf area, and that are better fitted when computed for 40cm-thick layers than for entire plants.

KEY WORDS: leaf area, plagiotropic axis, plant architecture, Python, randomized algorithm.

INTRODUÇÃO

De ponto de vista mecânico, as plantas vasculares apresentam as coleções de unidades modulares organizadas em um modo hierárquico aninhado (Borges, 2008). Módulos possuem as propriedades demográficas, porque cada um deles nasce, madurece, envelhece e morre. O ciclo da vida e história da vida de cada módulo pode ser interpretado independentemente do desenvolvimento da planta inteira (Preston & Ackerly, 2004) e normalmente ocorre em uma escala temporária menor do que a progressão ontogênica de plantas inteiras. As plantas são sujeitas às modificações das condições ambientais (luz, água e nutrição). As variações ambientais na escala de módulos podem provocar várias respostas (*e.g.* folhas de sol *versus* folhas de sombra) dentro de mesmas plantas (Chelle et al., 2005). A integração das variações primárias, expressas na escala organizacional de módulos, para a escala de planta inteira, traduz-se como a soma de todas as respostas modulares provocadas pelas modificações micro-ambientais, mais os efeitos de interação, os quais se devem a comunicação e integração comportamental de módulos (de Kroon et al., 2005).

A árvore multi-escalar (MTG) é um objeto matemático hierárquico de integração topológica dos módulos em plantas (Godin & Caraglio, 1998). Este objeto foi ampliado posteriormente para a apresentação de conjuntos das estruturas geométricas e topológicas na área de modelagem e arquitetura vegetal (Godin et al., 1999). As escalas de decomposição em componentes (módulos) botânicos em escalas mais finas e as relações entre os componentes (segue, ramifica) em MTG, representam a topologia da planta, enquanto as características quantitativas atribuídas aos componentes topológicos ajudam na reconstrução geométrica.

A arquitetura de plantas do gênero *Coffea* é descrita pelo modelo de Roux (Hallé et al., 1978) caracterizada pelo dimorfismo de ramos - presença de tronco principal ortotrópico e ramos laterais plagiotrópicos. As espécies deste gênero têm o crescimento contínuo. Café arábica (*Coffea arabica* L.) tem o tronco ortotrópico que é composto por folhas opostas e entrenós de comprimento relativamente regular. Cada par de folhas no eixo ortotrópico encontra-se em situação cruzada com o par inferior o que resulta em filotaxia oposta, cruzada ou decussada. Os ramos laterais de *C. arabica* são plagiotrópicos com a arquitetura achatada, também possuindo o padrão ortogonal – decussado de iniciação de pares de folhas (Dengler, 1999) e de distribuição de ramificações.

A forma de plantas definida pela distribuição de órgãos pode ser quantificada por funções dinâmicas, tais como polinomiais, lei de Poisson e binomiais. A probabilidade de produção de meristemas em espécies de crescimento rítmico mais frequentemente se define pela lei de Poisson, enquanto as suas neoformações e produção de espécies de crescimento contínuo se definem pela distribuição binomial (de Reffye et al., 1991). A *C. canéfora* foi primeira espécie vegetal a ser objeto de definição matemática arquitetural. Nesta espécie os ramos plagiotrópicos raramente possuem ramificações de 3ª e quando existem, estas são prolépticas. Nos ramos secundários, a inatividade de gemas se define pela lei do tipo sigmóide (de Reffye, 1982). Na *C. arabica* os eixos de primeira ordem (tronco) e segunda ordem (ramos plagiotrópicos que saem de tronco) possuem grande longevidade e comportam os ramos plagiotrópicos de 3ª a 5ª ordem (Rakocevic & Androcioli-Filho, 2010). Cada ano a intensiva formação de folhagem precede o investimento intensivo na maturação de frutos. A distribuição de folham, interceptação luminosa foliar e auto - sombreamento podem induzir os impactos importantes na qualidade final de frutos e bebida café (Vaast et al., 2006).

As informações sobre a arquitetura das plantas podem ser coletadas em várias escalas: 1) alto detalhamento, onde se medem todos os metâmeros de uma planta; 2) detalhamento baixo, medindo apenas os componentes mínimos para extrair algumas conclusões; 3) detalhamento médio pela amostragem, onde se utiliza uma forma de medição mais detalhada para módulos mais estratégicos e medições mais generalizadas para os outros (Godin et al., 1999). Em nossos experimentos atuais, as informações sobre a arquitetura de cafeeiros arábica são coletadas a partir de amostragem. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um software (AmostraCafe3D) auxiliar ao VPlants (2013), para inclusão de informações na escala de metâmeros em eixos parcialmente codificados, usando os padrões de módulos completamente medidos na escala mais fina – a de metâmeros. Para esta finalidade usaram-se métodos de interpolação, proporcionalidade e probabilidade de ocorrência de eventos botânicos.

MATERIAL E MÉTODOS

As primeiras reconstruções geométricas de cafeeiros arábica em 3D foram feitas a partir de medições morfológicas de alto detalhamento realizadas em indivíduos jovens (Charmentant & Rakocevic, 2010) e adultos (Rakocevic & Androcioli-Filho, 2010) na escala de metâmeros. O protocolo das reconstruções de cafeeiros (Rakocevic et al., 2013) está realizado com software VPlants desenvolvido sob a plataforma OpenAlea (Pradal et al., 2008), baseado na linguagem Architecture Modeling Language (AML). Esta linguagem foi desenvolvida para promover uma interação entre os usuários (biólogos, ecólogos, agrônomos) e modeladores. Em VPlants usa-se Python (mais especificamente a linguagem amlPy), a linguagem de programação orientada a objetos que fornece estruturas de dados (como dicionários), gerenciamento automático de memória, exceções, classes, módulos etc. (Sanner, 1999).

Atualmente, em nossos experimentos com cafeeiros, as informações arquiteturais estão coletadas pela amostragem (médio detalhamento), onde se consideram os estratos de 40 cm distribuídos verticalmente pelo dossel vegetal. Nestes estratos se escolhem quatro eixos orientados para quatro pontos cardeais (Norte, Oeste, Sul, Leste) e nestes se definem

angulações, ramificações e atributos de todos os metâmeros (comprimento de cada entrenó; presença, comprimento/largura e orientação/ inclinação de cada folha). Todos outros eixos de segunda ordem definem-se pela sua posição no eixo ortotrópico, o seu comprimento total, número total de frutos e a sua orientação. Todos os eixos ortotrópicos são definidos em grau de detalhamento igual aos quatro eixos plagiotrópicos secundários escolhidos pela amostragem em cada estrato de 40 cm.

Para verificação do software AmostraCafe3D usaram-se as informações arquiteturais em cafeeiros arábica cv. IAPAR 59 em plantas adultas. O experimento, com a plantação em 1995 nos campos IAPAR em Londrina, Paraná (23°18'S e 51°17'W), focou diferentes densidades e arranjos. As plantas foram cultivadas em duas densidades (6000 e 10000 plantas ha⁻¹) com a caracterização de distribuição extremamente retangular *versus* quadrangular. Os cafeeiros foram rececados duas vezes: em agosto de 2000 e em novembro de 2008. As plantas foram descritas em alto detalhamento (coletando atributos de todos os metâmeros), na frequência de quatro meses, voltando sempre em mesmas plantas (vinte por observação). A codificação de plantas em MTG foi realizada em três escalas de decomposição: plantas (P), galhos (G) e metâmeros (ortotrópicos – O e plagiotrópicos – E). Os MTG completos foram simplificados para imitar as coletas de informações morfológicas pela amostragem. Para isso, usaram-se as ramificações completamente descritas que no primeiro estrato (0 - 40 cm) pertencem aos ortotrópicos com índices 3 e 4 (sabendo que o tronco de suporte foi em média 25 cm), no segundo estrato (41 - 80 cm) que pertencem aos ortotrópicos com índices 7 e 8 e no terceiro estrato (acima de 80 cm) pertencem aos ortotrópicos com índices 13 e 14.

Através dos processamentos das maquetes (reconstruções de objetos em 3D) no software VegeSTAR (Adam et al., 2006) possibilita-se a estimação de área foliar, fotossíntese e interceptação luminosa de cada folha, camada ou planta inteira. Neste estudo usou-se o VegeSTAR para computar a área foliar de cada planta em observações 4 e 5 (fases fenológicas referentes a colheita de frutos em Junho de 2010 e a investimento em novas folhas em Outubro de 2010, respectivamente) pelas camadas (separação de 40 cm pelo eixo-z) de cafeeiros medidos em alto e médio detalhamento. A comparação entre estimações de plantas medidas detalhadamente *versus* processadas em AmostraCafe3D realizou-se usando indicadores de regressão linear - R², RMSE e o valor de bias médio - calculados em R 2.11.1 (R Development Core Team, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

LOGICA DO SOFTWARE

As entradas de software AmostraCafe3D são objetos matemáticos hierarquizados que apresentam topologia e geometria de plantas (MTG). As saídas do software são MTG de entrada enriquecidos com as informações incluídos após a computação. AmostraCafe3D considera duas situações de reconstrução que dependem da coleta de informações arquiteturais. Elas podem considerar 1) as definições instantâneas, ou 2) tratar as descrições dinâmicas dos mesmos indivíduos. A primeira situação ajuda na reconstrução das plantas codificadas sem nenhuma observação temporal prévia (chamada 'sem precedente'), enquanto a segunda permite as reconstruções quando existem as observações arquiteturais prévias efetuadas em mesmos indivíduos (chamada 'com precedente'). O protocolo de reconstrução é geral para ambas as situações e ele é composto por três módulos: 1) módulo de arquivo, 2) módulo de probabilidades e 3) módulo de reconstrução. O 'módulo de arquivo' é responsável por todas as operações de leitura e escrita de dados em arquivos, sejam eles mtg, xls ou dat. Para cada tipo de arquivo existente foi criada uma classe, que é responsável pelas operações de manipulação no arquivo. O 'módulo de probabilidades' tem como objetivo criar as sequências Markovianas a partir dos MTG de entrada e calcular as probabilidades de ocorrências de número de ramificações e de folhas a partir dos incididos em sequências. O 'módulo de reconstrução' é responsável por algoritmo que permite a reconstrução de uma planta inteira (Figura 1).

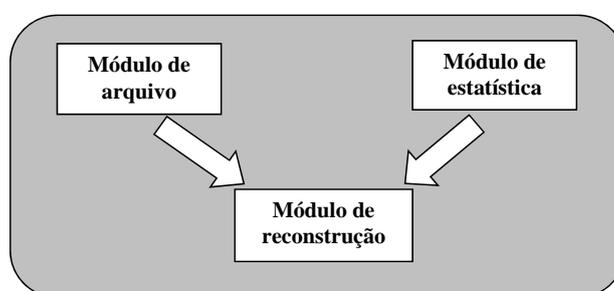


Figura 1 – Relação entre os três módulos do software

A lógica de inclusão de dados em eixos parcialmente medidos é baseada na informação sobre todos os eixos completamente medidos do estrato e da orientação procurada em todas as plantas. O comprimento de cada entrenó é estimado como média referente ao seu índice. As probabilidades de ocorrência de folhas e de ramificações utilizadas no 'módulo de reconstrução' são construídas a partir dos MTG que contêm todas as plantas do tratamento analisado (denominado 'MTG completo'). Criou-se uma classe no 'módulo de estatística' (denominada 'Estatística'), cujo

objetivo é verificar qual entrenó, eixo plagiotrópico e camada estão sendo reconstruídos. Com essas informações o ‘modulo de estatística’ verifica as informações relativas à presença/ausência de folhas e de ramificações nos eixos plagiotrópicos completamente medidos (eventos botânicos).

Após do processo de extração das probabilidades de ocorrência dos eventos, dentro do ‘módulo de estatística’, aplica-se um algoritmo randômico. Os experimentos randômicos ajudam para decidir, em um ou mais momentos durante a sua execução, o que fazer ou para onde ir (Figueiredo et al., 2007). Dentre os algoritmos randômicos existentes, destacam-se dois principais: 1) algoritmos Las Vegas e 2) algoritmo Monte Carlo. Cada um possui características distintas - o algoritmo Las Vegas tem o seu tempo de execução baseado em uma variável aleatória, enquanto que o algoritmo Monte Carlo, possui tempo de execução determinístico. No caso de AmostraCafe3D, o módulo estatístico recebe como parâmetro de entrada um vetor de probabilidades. Este vetor pode assumir duas formas: 1) para número de ramificações - $[x_0, x_1, x_2, x_3, x_4]$ - o índice apresenta o número de ramificações em um metâmero e cada posição do vetor indica a probabilidade de ocorrência do valor referente ao índice; 2) para número de folhas - $[x_0, x_1, x_2]$ - o índice apresenta o número de folhas e cada posição do vetor indica a probabilidade de ocorrência deste número. O algoritmo randômico tipo Las Vegas foi projetado de:

- 1) Receber como entrada um vetor de probabilidades, por exemplo, $[0; 0, 20; 0,80]$;
- 2) Criar um novo vetor de 1000 posições;
- 3) Distribuir os possíveis valores nesse novo vetor, respeitando a probabilidade de cada ocorrência do evento botânico analisado;
- 4) Escolher randomicamente um elemento desse vetor e passar o resultado para o ‘módulo de reconstrução’.

RECONSTRUÇÕES INSTANTÂNEAS DE FOLHAS E RAMIFICAÇÕES (‘SEM PRECEDENTE’)

Em situações quando não houve descrição prévia dos mesmos cafeeiros, o software primeiro recebe um MTG a ser reconstruído como entrada, mais um MTG com todas as outras plantas do tratamento junto com o xls atual da planta a ser reconstruída. Os processos depois seguem o procedimento descrito no subtítulo precedente. A última verificação consiste em ver se os eixos existentes no eixo ortotrópico são completamente medidos ou não. Caso os eixos sejam completamente medidos, faz-se apenas uma cópia, caso contrário, o ‘modulo de reconstrução’ chama o ‘modulo de estatística’ que irá verificar qual eixo nesta camada está sendo reconstruído para gerar as probabilidades de ocorrência. Essas probabilidades servem para a reconstrução do eixo plagiotrópico, até que o seu comprimento total seja alcançado. Quando existe uma exata ocorrência de folhas ou ramificação, o ‘modulo de reconstrução’ verifica no MTG completo qual das plantas possui a mesma quantidade de folhas/ramificação gerada pela probabilidade. As folhas e as ramificações são copiadas do MTG completo e inseridas na planta em reconstrução.

RECONSTRUÇÕES DINÂMICAS DE FOLHAS E RAMIFICAÇÕES (‘COM PRECEDENTE’)

A reconstrução dos cafeeiros em sequencia temporal (‘com precedente’) é pouco mais complexa. Começa-se com o recebimento de seis parâmetros de entrada: 1) MTG completo; 2) MTG da planta a ser reconstruída; 3) arquivo xls da planta a ser reconstruída; 4) índice da planta; 5) MTG reconstruído da mesma planta em observação temporária precedente e 6) MTG completo da observação precedente. O processo dinâmico de reconstrução de cafeeiros é similar ao das plantas ‘sem precedentes’. A diferença é que no processamento ‘com precedente’ considera-se o número de metâmeros junto com a presença de folhas/ramificação da observação prévia. Para cada ortotrópico, o ‘modulo de reconstrução’ verifica em quais entrenós da observação precedente existiam folhas/ramificação nesta planta. Após desta verificação, confere-se se aquela folha/ramificação foi modificada no MTG ‘Completo atual’ e inserem-se as atualizações no MTG a ser reconstruído. Esse processo de verificação com o cafeeiro reconstruído na observação precedente ocorre para todos os entrenós inseridos na observação precedente, com exceção dos três últimos, onde é aplicada a probabilidade igual a 1 de presença de folhas.

DISTRIBUIÇÕES DOS FRUTOS

Para inserção dos frutos usam-se a interpolação linear e a de Lagrange. A última determina uma função assumindo valores conhecidos em certos pontos (nós de interpolação). A classe de funções escolhida para a interpolação é *a priori* arbitrária e deve ser adequada às características que são pretendidas a ser interpoladas. Se os nós de interpolação não forem escolhidos convenientemente, a interpolação polinomial não será adequada. De um modo geral, o conjunto das funções interpoladoras é determinado por um número finito de parâmetros (no caso dos polinômios, são os seus coeficientes) que deverá ser igual ao número de condições impostas (ou seja, ao número de nós), para que haja apenas uma solução. A determinação dos parâmetros, que definem a função interpoladora, leva à resolução de um sistema linear.

VALIDAÇÃO DO SOFTWARE - ESTIMAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA FOLIAR

Em cafeeiros completamente descritos, preservaram-se os eixos plagiotrópicos definidos detalhadamente em somente algumas posições do eixo ortotrópico, para imitar a coleta de dados com detalhamento médio. Os arquivos referentes a observação 4 foram processados no software AmostraCafe3D em opção ‘sem precedentes’. Os mesmos cafeeiros foram processados ‘com precedentes’ no estágio de desenvolvimento mais avançado (observação 5). Comparou-se a área

foliar de todas as plantas em 3D (Figura 2A) produzida após a medição detalhada com a área foliar das plantas parcialmente medidas e processadas por AmostraCafe3D. A comparação de área foliar também foi realizada pelas camadas de 40 cm (Figura 2B). Área foliar originada de processamento por AmostraCafe3D é levemente maior do que em medições detalhadas (bias = 20.92 cm² para plantas inteiras e 13.38 cm² para camadas). As estimativas de plantas inteiras (Figura 2A) ajustam com R² aceitável (0.6002) e RMSE = 1181 cm² que apresenta mais do que 10% do desvio em plantas menores e aproximadamente 3% em plantas mais densas. O R² mostrou maior ajuste quando se comparam as camadas (0.94495, Figura 2B), com RMSE de 39 cm². As diferenças de estimativas devem-se provavelmente aos valores extremamente variáveis de camadas superior e inferior que ajustam melhor com maior número de repetição.

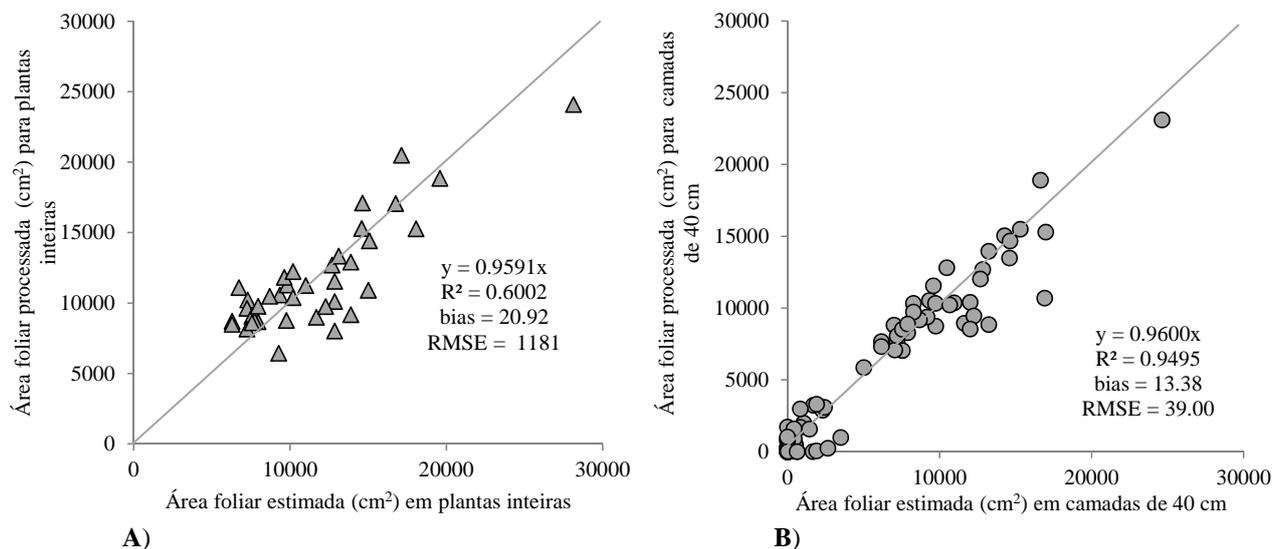


Figura 2 – Comparação de área foliar estimada em VegeSTAR a partir de maquetes reconstruídas em VPlants após as medições detalhadas e parciais. Área foliar de **A)** plantas inteiras e **B)** camadas de 40 cm formadas pelo perfil vertical.

Na manipulação ecofisiológica, as maquetes de cafeeiros serão usadas para os cálculos e computação de interceptação luminosa (Rakocevic & Androcioli-Filho, 2010), fotossíntese e transpiração referentes às camadas e plantas inteiras. Pretende-se usá-las *a posteriori* para diversas simulações ambientais, como foi realizado em algumas outras espécies perenes, tais como a macieira. O MAppleT (Markov Apple Tree) foi desenvolvido em L-sistemas para simular a topologia e geometria de macieira (Smith et al., 2008). Este software é baseado na estatística não paramétrica de modelos Markovianos, que definem os padrões de ramificação e a sequência das unidades de crescimento ao longo dos ramos. Para as unidades de crescimento consideram-se quatro estados (longo, médio, curto e florescente) e as transições entre eles são modeladas por modelo Markoviano oculto (Han et al., 2012). Para a espécie café arábica ainda não se conhece qual modelo Markoviano aplicar para definir os padrões de ramificação e de distribuição de área foliar e frutos. A busca por um modelo não paramétrico constitui-se em análises das sequências Markovianas, processo que está em andamento no nosso laboratório. Uma vez definido, o modelo Markoviano será incorporado em softwares de reconstrução de cafeeiros para gerar múltiplas combinações de saídas (simulações) estruturais e ecofisiológicas na escala diária durante o crescimento e desenvolvimento desta espécie.

CONCLUSÕES

O software AmostraCafe3D ajuda na reconstrução e distribuição de área foliar no espaço tridimensional de cafezal. A versão atual deste software, auxiliar ao VPlants, produz uma fraca superestimação de área foliar, melhor estimada em camadas de 40 cm do que em plantas inteiras. AmostraCafe3D fornece várias vantagens, pois com o uso dele não se faz necessário a medição de alto detalhamento de cafeeiros, mas apenas de algumas partes dela. O software pode evoluir no futuro com a inclusão de definições do modelo Markoviano de cafeeiros arábica, na determinação de padrões de ramificação, de distribuição de área foliar e de frutos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, B.; DONES, N.; SINOQUET, H. **VegeSTAR: software qui calcule l'interception lumineuse et la photosynthèse**. Version 3.2. Clermont-Ferrand: INRA. 2006.
- BORGES, R. M. Plasticity comparisons between plants and animals, Concepts and mechanisms. **Plant Signaling & Behavior**, v. 3 n. 6, p. 367-375, Jun. 2008.

- CHELLE, M. Phylloclimate or the climate perceived by individual plant organs: What is it? How to model it? What for? **New Phytologist**, v. 166, n. 3, p. 781–790, Jun. 2005.
- CHARMETANT P.; RAKOCEVIC, M. Morphological response to drought of *Coffea arabica* (L.). In: **Proceedings of the 23rd International Conference on Coffee Science, Genomics and Genetics**, Bali, Set. 2010.
- DENGLER N. G. Anisophylly and dorsiventral shoot symmetry. **International Journal of Plant Sciences**, Chicago, v.160, n.S6, p. 67-80, Nov. 1999.
- FIGUEIREDO, C. M. H. de; FONSECA, G. D. da; LEMOS, M. J. M. S.; SÁ, V. G. P. de. Introdução aos algoritmos randomizados. In: **Actas de 26^o Colóquio Brasileiro de Matemática**, p. 1-30, Rio de Janeiro. 2007.
- GODIN, C.; CARAGLIO, Y. A multiscale model of plant topological structures. **Journal of Theoretical Biology**, v. 191, n. 1, p. 1-46, Mar. 1998.
- GODIN, C.; COSTES, E.; SINOQUET, H. A plant architecture description method integrating topology and geometry. **Annals of Botany**, v. 84, n. 3, p. 343-357, Set. 1999.
- HALLÉ, F.; OLDEMAN, R. A. A.; TOMLINSON, P. B. **Tropical trees and forests: an architectural analysis**. Berlin: Springer-Verlag, 1978. 441 p.
- HAN, L.; COSTES, E.; BOUDON, F.; COKELAER, F.; PRADAL, C.; SILVA, D.; FAIVRE, R. Investigating the Influence of Geometrical Traits on Light Interception Efficiency of Apple Trees: a Modelling Study with MAppleT. In: **Proceedings of 4th International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications**, p. 152-159, Shanghai, Nov. 2012.
- KROON, H. de; HUBER, H.; STUEFER, J.F.; VAN GROENENDAEL, J.M. A modular concept of phenotypic plasticity in plants. **New Phytologist**, v. 166, n. 1, p. 73-82, Apr. 2005.
- OPENALEA. Disponível em: <<http://openalea.gforge.inria.fr/dokuwiki/doku.php?id=openalea>>. Acesso em: 1 Jul. 2013.
- PRADAL, C.; DUFOUR-KOWALSKI, S.; BOUDON, F.; GODIN, C. OpenAlea: a visual programming and component-based software platform for plant modeling. **Functional Plant Biology**, v. 35, n. 9-10, p. 751-760, Set./Out. 2008.
- PRESTON, K.A.; ACKERLY, D.D. Allometry and evolution in modular organisms. In: PIGLIUCCI, M.; PRESTON, K.A, eds. **Modularity and Phenotypic Complexity**. Oxford, UK: Oxford University Press, p. 80–106, 2004.
- R Development Core Team, 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 1 Jul. 2013.
- RAKOCEVIC, M.; ANDROCIOLI-FILHO, A. Morphophysiological characteristics of *Coffea arabica* L. in different arrangements: lessons from a 3d virtual plant approach. **Coffee Science**, v. 5, n. 2, p. 147-166, Mai./Ago. 2010.
- RAKOCEVIC, M.; MATSUNAGA, F. T.; COSTES, E.; TOSTI, J. B.; GUÉDON, Y.; SANTIN, L. C. de; JOHANN, A.L. Protocol for foliage modeling and light partitioning in *Coffea arabica*. In: **Proceedings of the 7th FSPM**, p. 284-286, Saariselka, Finland, Jun. 2013.
- REFFYE, Ph. de. Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. **Café Cacao Thé**, Paris, n. 26, v. 2, p. 77-96, 1982.
- REFFYE, Ph. de; ELGUERO, E.; COSTES, E. Growth Units Constructions in Trees: A Stochastic Approach. **Acta Biotheoretica**, v. 39, n. 3-4, p. 325 - 342, Dec. 1991.
- SANNER, M. F. **Python: A Programming Language for Software Integration and Development**. Scripps Research Institute, La Jolla, CA. 1999.
- SMITH, C.; GODIN, C.; GUEDON, Y.; PRUSINKIEWICZ, P.; COSTES, E. Integrating biomechanical and Markov chain models into an L-system simulation of architectural development of apple trees. **Acta Horticulturae**, v. 803, p. 193-200, 2007.
- VAAST, Ph.; BERTRAND, B.; PERRIOT, J-J.; GUYOT, B.; GÉNARD, M. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 1, p. 197-204, Jan. 2006.
- VPLANTS. Disponível em: <<http://www-sop.inria.fr/virtualplants/wiki/doku.php?id=home>>. Acesso em: 1 Jul. 2013.