

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

RICARDO LUÍS BINSFELD

**Aplicabilidade do Modelo MClone na  
Síntese de Padrões Visuais do Reino Vegetal**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do grau de  
Mestre em Ciência da Computação

Prof. Dr. Marcelo Walter  
Orientador

Porto Alegre, abril de 2013

## CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Binsfeld, Ricardo Luís

Aplicabilidade do Modelo MClone na Síntese de Padrões Visuais do Reino Vegetal / Ricardo Luís Binsfeld. – Porto Alegre: PPGC da UFRGS, 2013.

86 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação, Porto Alegre, BR-RS, 2013. Orientador: Marcelo Walter.

1. Padrões visuais. 2. Reino vegetal. 3. Mosaico de clones.  
I. Walter, Marcelo. II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Vladimir Pinheiro do Nascimento

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Luís da Cunha Lamb

Coordenador do PPGC: Prof. Luigi Carro

Bibliotecária-chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

*“Comprendí que si estoy aquí,  
Es porque yo así lo decidí,  
Conocer y reconocer,  
Que nada es perfecto,  
Y el defecto es bello también.”*

— CHRISTIAN CHÁVEZ (Libertad (feat. Anahí))

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à toda minha família, principalmente meus pais e irmãos, por sempre terem me apoiado em todas as minhas decisões, me dando força nos momentos difíceis e sendo motivo de muitos dos momentos de alegria.

Um agradecimento especial também a todos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado. Aos de São Martinho e de Foz do Iguaçu, que apesar do tempo para nos revermos e da distância, jamais deixaram de estar presentes na minha vida e sei que sempre poderei contar com a amizade deles. Aos de Porto Alegre, que apesar de recente, me apoiaram fortemente nesse percurso, me proporcionando momentos de alegria e de companheirismo nas horas difíceis. E alguém em especial, que está firmemente ao meu lado, me propondo momentos de felicidade e tranquilidade.

Agradeço ao professor e orientador Dr. Marcelo Walter, por ter me acompanhado nesse período, me apoiando nas minhas decisões e, principalmente, sempre me incentivando e motivando no andamento deste trabalho. A todos os colegas e professores do grupo de pesquisa em Computação Gráfica, pelo apoio e companheirismo nesse percurso. Em especial ao Marcelo Malheiros, pela ajuda com seu conhecimento em Blender, ao Guilherme Oliveira, pelo auxílio com o modelo de Perlin Noise, e ao Henrique e Hermandi, pelo apoio no levantamento bibliográfico.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Dedico a estes minha alegria por chegar ao fim deste percurso. Obrigado!

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	7
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	8
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	9
<b>LISTA DE TABELAS</b>	12
<b>RESUMO</b>	13
<b>ABSTRACT</b>	14
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	15
1.1 Estrutura do Trabalho	17
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	19
2.1 Reino Vegetal em Computação Gráfica	22
2.1.1 Modelagem de Padrões	23
2.2 Discussão	27
<b>3 METODOLOGIA</b>	28
3.1 Fundamentos Biológicos	28
3.1.1 Possível classificação dos padrões visuais no Reino Vegetal	28
3.1.2 Pigmentos de plantas	29
3.1.3 Formação de padrões no Reino Vegetal	30
3.2 MClone	31
3.2.1 Definição Geral do MClone	32
3.2.2 Primitivas de Controle	35
3.2.3 Textura	36
3.2.4 Anisotropia	36
3.3 Discussão	39
<b>4 RESULTADOS</b>	40
4.1 Geração de Padrões do Reino Vegetal	40
4.1.1 Padrões Não Estruturados	42
4.1.2 Padrões Parcialmente Estruturados	46
4.1.3 Padrões Estruturados	50
4.2 Refatoração do Código Fonte	52
4.3 Discussão	53

<b>5 CONCLUSÃO</b> . . . . .	55
<b>5.1 Trabalhos Futuros</b> . . . . .	56
<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	58
<b>APÊNDICE A</b> . . . . .	62
<b>APÊNDICE B</b> . . . . .	63
<b>BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA</b> . . . . .	65
<b>ANEXO A</b> . . . . .	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MClone	Modelo Procedural Mosaico de Clones
RBF	<i>Radial Basis Function</i>
HSV	<i>Hue, Saturation e Value</i>
CG	Computação Gráfica
RV	Reino Vegetal

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_i$	Número de células iniciais
$T$	Tipo de célula
$F$	Tipo de célula de primeiro plano
$B$	Tipo de célula de fundo
$M$	Tipo de célula de plano intermediário
$D_T$	Taxa de divisão das células do tipo $T$
$\rho_i$	Taxa de relaxamento inicial
$\rho_s$	Taxa de relaxamento na simulação
$\alpha_{TT}$	Taxa de adesão entre as células do tipo $T$
$\omega_r$	Fator de escala do raio de repulsão
$\omega_d$	Força escalar repulsiva
$\omega_a$	Magnitude da anisotropia
$\vec{v}$	Vetor



## LISTA DE FIGURAS

1.1	Exemplos de padrões do reino vegetal: folhagens (esquerda), flores (centro) e abóboras (direita). . . . .	15
1.2	Exemplos de padrões em animais obtidos por meio do modelo procedural MClone. À esquerda um exemplo de uma girafa (WALTER; FOURNIER; MENEVAUX, 2001) e à direita de um cavalo e de uma vaca (QUEIROZ; WALTER, 2012). . . . .	16
1.3	Exemplos de resultados obtidos aplicando o modelo procedural MClone para os padrões do Reino Vegetal. . . . .	17
2.1	Relação de trabalhos de Computação Gráfica no Reino Vegetal. . . . .	20
2.2	Relação de trabalhos de Computação Gráfica conforme partes específicas do Reino Vegetal. . . . .	20
2.3	Evolução no tempo dos trabalhos de Computação Gráfica aplicados ao Reino Vegetal. . . . .	21
2.4	Exemplo de modelagem geométrica de uma planta a partir de imagens (LIVNY et al., 2011). . . . .	22
2.5	Exemplo de modelagem do ciclo de crescimento de uma flor (IJIRI et al., 2008). . . . .	23
2.6	Exemplo de modelagens de interiores de objetos (TAKAYAMA et al., 2008). . . . .	23
2.7	Resultados de padrões de madeira apresentados por Yessios (YESSIOS, 1979). . . . .	24
2.8	Projeção do resultado matemático de uma flor de girassol obtido por Vogel (VOGEL, 1979). . . . .	24
2.9	Exemplos de padrões de ramificações apresentados por Viennot (VIENNOT et al., 1989). . . . .	25
2.10	Padrão de veias gerados a partir de um Sistema de Transporte de Partículas (Esquerda: folha real; Centro/Direita: resultados obtidos por meio do modelo) (RODKAEW et al., 2002). . . . .	25
2.11	Padrões de cores obtidas a partir do movimento de partículas (RODKAEW; CHONGSTITVATANA; SIRIPANT, 2004). . . . .	26
2.12	Exemplos de possíveis padrões de veias gerados a partir do modelo apresentado pela equipe de Runios (RUNIONS et al., 2005). . . . .	26
2.13	Exemplo de padrões de veias (RUNIONS et al., 2005). . . . .	27
2.14	Exemplos padrões de cores de flores gerados por Reação-Difusão (Esquerda: resultados em escala de cinza; Direita: resultados traduzidos em cores) (ZHOU et al., 2007). . . . .	27

3.1	Padrão estruturado, parcialmente estruturado e não estruturado no Reino Vegetal. . . . .	28
3.2	Exemplos de padrões visuais de folhas. . . . .	29
3.3	Exemplos de padrões visuais de flores. . . . .	29
3.4	Exemplos de pigmentos: antocianinas, betalaínas e carotenóides. . . . .	30
3.5	Resultados obtidos por meio do MClone: Girafa (esquerda), Leopardo (centro) e borboleta (direita). . . . .	32
3.6	Resultados obtidos por meio do MClone: Vaca (esquerda), Zebra (centro) e Cabra (direita). . . . .	32
3.7	Exemplo de distribuição de células sem (esquerda) e com (direita) relaxamento inicial ( $\rho_i$ ) (WALTER; FOURNIER; REIMERS, 1998). . . . .	34
3.8	Objetos e seus respectivos cilindros. . . . .	35
3.9	Exemplo de uma imagem binária de textura, cilindro ao qual a mesma é aplicada e resultado da criação das células iniciais no objeto, respectivamente. . . . .	37
3.10	Vetores de controle informados pelo usuário (superior) e campo vetorial gerado a partir da interpolação dos vetores de controle (inferior). . . . .	38
3.11	Campo vetorial do objeto representado por meio de desenho de vetores e por meio de sistema de cores HSV, respectivamente. . . . .	39
4.1	<i>Codiaeum Variegatum</i> real (esquerda) e simulação obtida a partir do MClone. . . . .	43
4.2	Três variações individuais providas pelo MClone com base nos mesmos parâmetros de simulação. . . . .	43
4.3	Envelhecimento de uma <i>C. Variegatum</i> com a passagem dos dias de simulação em uma mesma execução. Número total de dias variando entre 5, 15, 20 e 30, respectivamente. . . . .	44
4.4	Variação de uma <i>C. Variegatum</i> quase toda verde a uma quase toda amarela. Probabilidades iniciais de células do tipo $F$ dadas por 0.9, 0.7, 0.5, 0.2, 0.1. . . . .	44
4.5	Resultado aplicando o modelo de Perlin Noise, tentando simular a evolução do padrão através do tempo. Compare essa evolução com o resultado da Figura 4.6. . . . .	45
4.6	Simulação da evolução do padrão através do tempo usando o modelo MClone. Um grupo de células que definem uma mancha expande sua fronteira de forma consistente. . . . .	45
4.7	Repetições de elementos: potencial desvantagem da utilização do modelo de Perlin Noise nos tipos de padrões abordados neste trabalho. . . . .	45
4.8	Exemplos real (esquerda) e sintetizado (direita) de <i>Cereus Hildemmannianus</i> variando a probabilidade inicial das células do tipo $F$ de 0.1% à 0.3%. . . . .	46
4.9	Exemplo de <i>Cereus Hildemmannianus</i> real (esquerda) e sintetizado (direita) com manchas mais uniformes. . . . .	47
4.10	Exemplo de uma planta <i>Philodendron Oxycardium</i> real (esquerda) e sintetizada pelo MClone (direita). . . . .	47
4.11	Cilindro e textura utilizados para a geração das folhas da planta <i>Philodendron Oxycardium</i> . . . . .	48

4.12	Exemplos de folhas da planta <i>Philodendron Oxycardium</i> , variando o tempo de execução entre 23 (superior), 27 (meio) e 30 (inferior) dias.	49
4.13	Cactus <i>Cereus Hildemannianus</i> com padrão parcialmente estruturado.	49
4.14	Exemplo de cogumelo real (esquerda) e cogumelo gerado pelo MClone (direita).	50
4.15	Exemplos de cogumelos sintetizados pelo MClone, variando a taxa de divisão de células $F$ entre 6, 8 e 20, respectivamente.	50
4.16	Exemplos de melancias ( <i>Citrullus Lanatus</i> ) com aumento da largura das listras por meio de variação no $w_r$ .	51
4.17	Exemplo de melancia esférica real (esquerda) e sintetizada (direita).	51
4.18	Exemplo de melancia quadrada real (esquerda) e sintetizada (direita).	51
4.19	Popular Espada de São Jorge real (esquerda) e sintetizada pelo MClone (direita).	52
5.1	Exemplos de padrões visuais diretamente associados à estrutura venosa da folha.	56

## LISTA DE TABELAS

3.1	Atributos definidos para cada tipo ou par de tipos de células. . . . .	33
4.1	Principais parâmetros utilizados para a sintetização de padrões do Reino Vegetal utilizando o MClone. . . . .	41
1	Trabalhos de Computação Gráfica aplicados ao Reino Vegetal classificados por ano. . . . .	62
2	Trabalhos de Computação Gráfica aplicados ao Reino Vegetal - Parte 1.	63
3	Trabalhos de Computação Gráfica aplicados ao Reino Vegetal - Parte 2.	64

## RESUMO

Um dos objetivos permanentes da Computação Gráfica é a representação fiel, e por consequência realista, da aparência de objetos e cenas sintetizadas. Para objetos e cenas do Reino Vegetal pode-se dizer que houve um grande avanço nos métodos para modelagem da forma e propriedades de reflexão de elementos individuais, como folhas, e de coleções de elementos, como árvores, vegetação em geral e florestas. Por outro lado, as técnicas para modelagem de padrões visuais presentes em muitos objetos naturais do Reino Vegetal, como listras de melancias ou padrões em folhas e flores, não tem recebido a mesma atenção.

O presente trabalho tem por objetivos principais o estudo de técnicas de Computação Gráfica aplicáveis ao Reino Vegetal, principalmente explorar o modelo procedural Mosaico de Clones (MClone), desenvolvido em pesquisas anteriores, para a síntese de padrões visuais familiares do Reino Vegetal. Nossos resultados mostram que, neste contexto, um modelo procedural tem vantagens sobre outras técnicas, como, por exemplo, mapeamento de texturas, pois geralmente esses padrões são necessários em grande quantidade, e, ao menos para algumas plantas, com muitas variações geométricas, a atribuição de coordenadas de textura consistentes é um desafio. Nós mostramos resultados para frutos, cactus e pequenas folhagens decorativas, que confirmam a aplicabilidade do MClone para uma ampla gama de padrões do Reino Vegetal.

**Palavras-chave:** Padrões visuais, reino vegetal, mosaico de clones.

## **Applicability of the MClone Model for Synthesis of Visual Patterns from the Plant Kingdom**

### **ABSTRACT**

There has been a lot of progress in modeling and rendering elements of our Natural World for computer graphics tasks. In the Plant Kingdom, techniques for modeling the visual patterns presented in many natural objects (such as stripes on a watermelon or spots on flowers) have advanced far less than methods for modeling the shape and reflectance properties of individual or large collections of elements (such as leaves and trees).

In this work we want to explore the procedural Clonal Mosaic Model (MClone), developed in previous research, for synthesis of many familiar visual patterns from the Plant Kingdom. Our results show that in this context a procedural model has advantages over other techniques such as texture mapping, since these patterns are often needed in large quantities, and at least for some plants, with many geometric variation, assigning consistent texture coordinates is a challenge. We show results for fruits, cactus, and small decorative plants, which confirm the applicability of the MClone model for synthesis of a large group of visual patterns in the Plant Kingdom.

**Key words:** visual patterns, plant kingdom, clonal mosaic patterns.

# 1 INTRODUÇÃO

Desde o início da Computação Gráfica, usualmente atribuída à tese de doutorado de Sutherland (SUTHERLAND, 1963), a mesma evoluiu muito e hoje representa uma das principais forças impulsionadoras num mercado ávido por novas tecnologias visuais. Uma motivação constante da área é a busca da fidelidade visual dos resultados, ou seja, numa espécie de teste de Turing visual, ser capaz de sintetizar imagens que consigam enganar ao observador e passem por fotografias do fenômeno sendo estudado (FERWERDA, 2003).

Uma das possíveis classificações da área divide os objetos e fenômenos em dois grandes grupos: naturais e manufaturados. Se fizermos uma retrospectiva histórica da evolução da área em relação aos fenômenos naturais, observaremos que de maneira semelhante à natureza, a evolução das técnicas de computação gráfica seguiu os três reinos principais: mineral, vegetal e animal. Hoje, já conseguem-se resultados visuais satisfatórios para a maioria dos fenômenos do reino mineral (WEIDLICH; WILKIE, 2008; PEYTAVIE et al., 2009) e parcialmente do reino vegetal (DIENER et al., 2009) e animal (WALTER; FOURNIER; REIMERS, 1998).

Entre os muitos fenômenos naturais já abordados em computação gráfica, a partir de um levantamento bibliográfico, chegamos a conclusão que no Reino Vegetal o foco tem sido mais na modelagem geométrica de formas individuais e de coleções de elementos, tais como árvores e vegetação em geral, juntamente com as propriedades de reflexão do tecido vegetal. Em contraste, tem sido dada pouca atenção à modelagem detalhada dos padrões visuais de elementos individuais, tais como listras de melancias ou manchas em folhas e flores, o que nos remete a uma área pouco explorada e com um grande potencial investigativo a ser abordado. Na Figura 1.1 podemos observar alguns exemplos da grande gama de padrões visuais presentes no Reino Vegetal.



Figura 1.1: Exemplos de padrões do reino vegetal: folhagens (esquerda), flores (centro) e abóboras (direita).

Uma solução usual para modelar estes padrões é a utilização de mapeamento de textura. No entanto, muitos desses padrões são familiares e ubíquos, possuindo variações visuais individuais, e muitas vezes necessárias em grande número. Embora o mapeamento de textura seja uma escolha comum, defendemos que, neste caso, uma abordagem de texturização procedural possa ser mais apropriada, uma vez que um bom modelo procedural aborda estas exigências.

O modelo Mosaico de Clones, ou MClone, foi desenvolvido com o objetivo de reproduzir os padrões existentes no Reino Animal, mais propriamente dito, animais com coloração amarela/marrom, como girafas (WALTER; FOURNIER; MENEVAUX, 2001), grandes felinos (MOREIRA; WALTER, 2002) e, mais recentemente, animais preto e branco, como algumas espécies de gado, cavalos e zebras (QUEIROZ; WALTER, 2009). Este modelo procedural mostrou uma grande flexibilidade na geração do padrões do reino animal, por reproduzir não apenas resultados visualmente semelhantes, mas também por ser um modelo biologicamente plausível, com a obtenção de resultados com variações únicas, permitindo a reprodução de padrões em grande escala. Podemos observar alguns resultados obtidos por meio desse modelo na Figura 1.2.

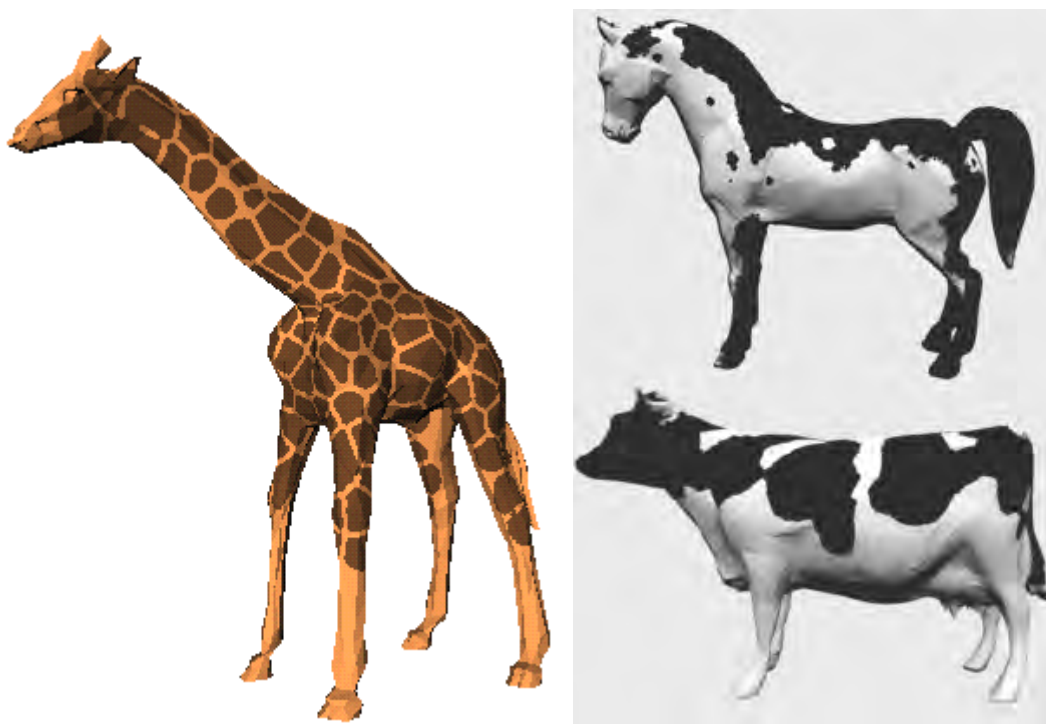


Figura 1.2: Exemplos de padrões em animais obtidos por meio do modelo procedural MClone. À esquerda um exemplo de uma girafa (WALTER; FOURNIER; MENEVAUX, 2001) e à direita de um cavalo e de uma vaca (QUEIROZ; WALTER, 2012).

Com base nos resultados obtidos pelo MClone para o Reino Animal e na grande gama de possíveis padrões existentes e pouco explorados no Reino Vegetal, juntamente com o trabalho previamente apresentado por Korn, onde ele defende que o MClone tem um grande potencial para explicar os padrões estriados encontrados em muitos frutos, como, por exemplo, na melancia (KORN, 2007), detectou-se um grande potencial a ser explorado: o estudo da aplicabilidade do modelo MClone na síntese de padrões visuais do Reino Vegetal.

A principal contribuição deste trabalho é a comprovação da capacidade do modelo



MClone para a reprodução de grande parte dos padrões propostos, comprovando a flexibilidade e aplicabilidade do modelo para o propósito deste trabalho. Juntamente com os resultados, apresentamos as vantagens e desvantagens da utilização deste modelo. Apesar de ter uma complexidade inicial para chegar nos valores necessários para obter os padrões desejados, acredita-se que estes são visualmente satisfatórios. Na Figura 1.3 apresentamos alguns resultados obtidos neste trabalho.



Figura 1.3: Exemplos de resultados obtidos aplicando o modelo procedural MClone para os padrões do Reino Vegetal.

## 1.1 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2 apresentaremos um levantamento bibliográfico relacionando duas áreas de estudos muito importantes para nosso trabalho, em que foram analisados inúmeros trabalhos da Computação Gráfica vinculados com o Reino Vegetal. Mostraremos primeiramente um resumo de alguns dos principais trabalhos avaliados e, em seguida, discutiremos os trabalhos que abordam padrões existentes no Reino Vegetal.

No capítulo 3 analisaremos os métodos utilizados para o desenvolvimento desta dissertação. Primeiramente faremos um breve estudo referente aos padrões existentes no Reino Vegetal, apresentando uma possível classificação dos padrões existentes neste âmbito. Posteriormente apresentaremos a técnica utilizada para obter os resultados deste trabalho, o modelo Mosaico de Clones, ou MClone, onde discutiremos suas abordagens até o momento, juntamente com uma descrição do seu funcionamento.

Em seguida, no capítulo 4, mostraremos e discutiremos os resultados obtidos utilizando o modelo procedural MClone para a reprodução de padrões existentes no Reino Vegetal, onde analisaremos as vantagens e desvantagens deste modelo para cada resultado estudado, avaliaremos possíveis variações nestes padrões e compararemos inclusive com outras técnicas para a reprodução de padrões similares. Finalmente, no capítulo 5, apresentaremos as conclusões e descreveremos o que ainda pode ser explorado em trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Carolus Linnaeus em seu clássico livro de 1735, *Systema Naturae*, introduziu uma classificação hierárquica do mundo natural em três grupos principais, chamados reinos: mineral, vegetal e animal. Esse sistema não está mais em uso, mas ainda vive em nossas mentes como parte da nossa cultura geral. A Computação Gráfica abordou e continua abordando fenômenos e objetos de todos os três reinos.

Para este trabalho foi realizado um levantamento bibliográfico nas principais bases bibliográficas, como graphbib da ACM/Siggraph e DBLP, com o objetivo de avaliar trabalhos já realizados em Computação Gráfica relacionados ao Reino Vegetal, e, desse modo, descobrir possíveis tópicos de pesquisa a serem abordados.

Este levantamento foi realizado inicialmente com base em algumas palavras chaves, as quais serão relatadas juntamente com a Figura 2.2. Estas palavras foram definidas por meio de pesquisas e consideradas os principais termos abordados nos trabalhos relacionados ao Reino Vegetal. Posteriormente também foi realizada uma análise nas referências bibliográficas das principais publicações encontradas, com o intuito de averiguar referências que por ventura não tenham sido encontradas na busca inicial. Os trabalhos encontrados nesse levantamento passaram por uma triagem, analisando sua real relação com a Computação Gráfica e o Reino Vegetal.

Pode-se observar uma grande gama de soluções nessa área, sendo avaliadas mais de 200 publicações de 1979 a 2011. Podemos classificar essas abordagens de duas maneiras: como é a distribuição entre as áreas da Computação Gráfica (Figura 2.1) e nos fenômenos do Reino Vegetal (Figura 2.2).

O gráfico da Figura 2.1 foi classificado com base nas três principais divisões da Computação Gráfica: renderização, modelagem e animação, além do foco desse trabalho: padrões. Nota-se, nesse contexto, que a maior parte destes trabalhos referem-se a modelagem, seguidos por renderização e animação, havendo pouca ênfase em abordagens de padrões visuais, tal como proposto neste trabalho.

Do total, temos mais de 145 trabalhos que tem como objetivo a modelagem do Reino Vegetal. Já na área de renderização e animação temos, respectivamente, em torno de 35 e 30 trabalhos, enquanto que apenas oito trabalhos com ênfase em padrões existentes no Reino Vegetal, isso levando em consideração não apenas padrões visuais de cores, e sim também padrões de formas e padrões de florestas. É importante ressaltar que, desses trabalhos, na faixa de 20 deles abordam mais de uma das áreas classificadas aqui.

No gráfico da Figura 2.2 foi feita a classificação das publicações com base em temas encontrados nos próprios trabalhos. A classificação como *plants*, é referente a trabalhos que tem como objetivo a abordagem de plantas como um todo, tanto referente a uma variedade de plantas, quanto a um conjunto de plantas, como florestas. A classificação como *trees* é para publicações que tem como foco mais específico árvores, propriamente

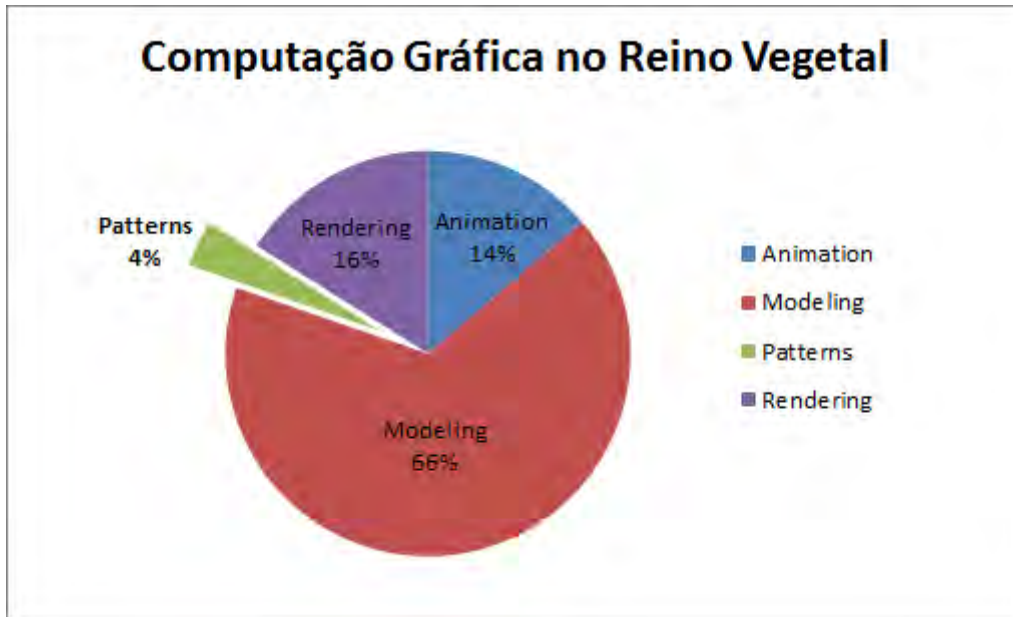


Figura 2.1: Relação de trabalhos de Computação Gráfica no Reino Vegetal.

dito. As demais divisões, como *flowers*, *fruits*, *bark* e *leaves*, referem-se a trabalhos que tem tratado partes específicas de uma planta, como, respectivamente, flores, frutos, cascas de árvores e folhas. Já na categoria *others* encaixam-se os demais trabalhos, os quais não se enquadram nas demais categorias.

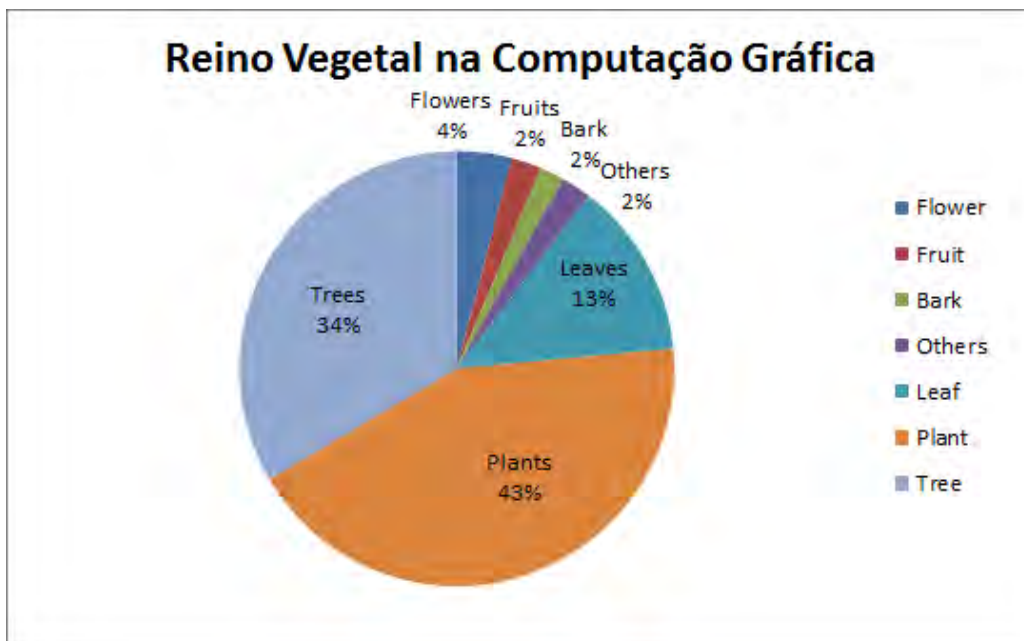


Figura 2.2: Relação de trabalhos de Computação Gráfica conforme partes específicas do Reino Vegetal.

Como podemos verificar, aproximadamente 77% dos trabalhos referem-se a vegetação como um todo, onde, em torno de 90 desses trabalhos tem como foco as plantas em geral e, em na faixa de 70 tem como objetivo um pouco mais específico a estruturação de árvores. Dos demais 23% das publicações, temos a maior parte com foco em folhas, em

torno de 28 trabalhos, porém, estes tem pouca preocupação com a influência das cores na aparência das folhagens. Com menos abordagens, porém não menos importantes, seguem nove trabalhos com ênfase em flores, seis com foco em frutos e quatro sobre cascas de árvores, além de cinco outros trabalhos, com foco entre líquens, raízes e penugens de plantas.

A partir deste gráfico, pode-se observar que a grande maioria dessas publicações relacionam-se com plantas e árvores de modo geral, havendo pouca ênfase em partes específicas do Reino Vegetal, como, por exemplo, folhas, flores, frutos ou sementes, os quais possuem uma enorme variedade de detalhes em suas formas e cores, havendo uma grande gama de possíveis padrões visuais a serem abordados.

Na Tabela 1 do Apêndice A apresentamos os trabalhos de Computação Gráfica relacionados ao Reino Vegetal, levantados neste estudo, classificados por ano de publicação. Percebe-se que no ano de 2009 teve um pico de trabalhos, avaliando o motivo desse aumento de publicações percebeu-se que 40% destes trabalhos foram publicados em um evento de Computação Gráfica aplicada ao Reino Vegetal, conhecido como *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA 2009)*. No gráfico da Figura 2.3 podemos observar a evolução no tempo dessas publicações.

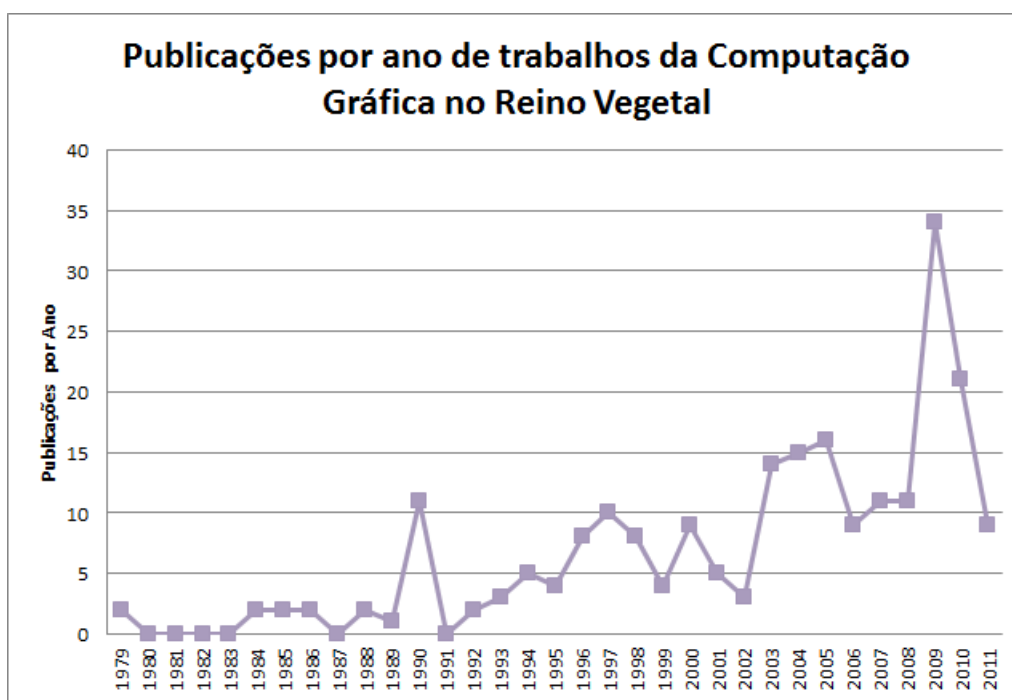


Figura 2.3: Evolução no tempo dos trabalhos de Computação Gráfica aplicados ao Reino Vegetal.

Já nas Tabelas 2 e 3 do Apêndice B estão esses mesmos trabalhos apresentados pelas classificações do Reino Vegetal versus Computação Gráfica, como vistos nos gráficos das Figuras 2.1 e 2.2. Pode-se perceber a grande concentração de trabalhos em Computação Gráfica na área de modelagem, como também nos trabalhos relacionados ao Reino Vegetal a grande abordagem em plantas e árvores em geral.

Na seção seguinte, serão destacadas algumas abordagens referentes a diversos aspectos no contexto do Reino Vegetal, seguindo com um olhar mais detalhado em trabalhos relacionados especificamente aos padrões visuais nessa área.

## 2.1 Reino Vegetal em Computação Gráfica

Na área de computação gráfica, o Reino Vegetal apareceu pela primeira vez no final dos anos 70, onde um modelo para representação de madeira, plantas e pedras foi apresentado por Yessios (1979). Na mesma época, o trabalho pioneiro de Vogel introduziu um formalismo matemático para a modelagem do padrão da estrutura de sementes de girassol (VOGEL, 1979). Esses trabalhos serão abordados com maiores detalhes na seção seguinte.

Em meados dos anos 90, o Prof. Prusinkiewicz e colegas exploraram em grande escala o aspecto de modelagem da forma de plantas, flores e até ecossistemas inteiros em diversos trabalhos utilizando L-systems (PRUSINKIEWICZ; LINDENMAYER, 1996; DEUSSEN et al., 1998; PRUSINKIEWICZ et al., 2001). Alguns trabalhos se preocuparam com a modelagem visual da reflexão em folhas, como um modelo de iluminação em tempo-real (WANG et al., 2005) ou utilizando o processo físico de transmissão da luz (SOLER et al., 2003; HABEL; KUSTERNIG; WIMMER, 2007). A modelagem da "penugem" presente na superfície de alguns tipos de plantas também foi abordada (FUHRER; JENSEN; PRUSINKIEWICZ, 2004).

Em 2007, foi apresentada uma modelagem geométrica e visual de plantas inteiras, a partir de poucas imagens de uma planta real (TAN et al., 2007). A pesquisa nessa área ainda é forte, como exemplificado por recentes contribuições para a reconstrução fiel de árvores a partir de coleções de pontos (LIVNY et al., 2011; KANG, 2011). Na Figura 2.4 é ilustrada esta modelagem.

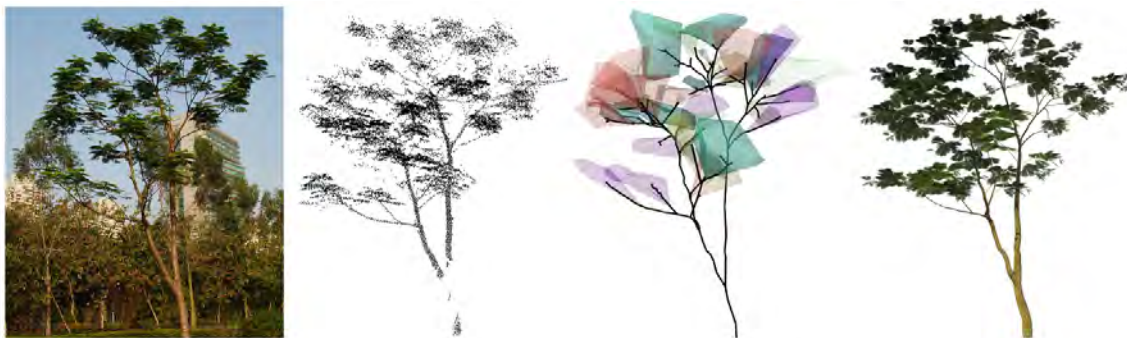


Figura 2.4: Exemplo de modelagem geométrica de uma planta a partir de imagens (LIVNY et al., 2011).

Runions e colegas introduziram uma classe de algoritmos biologicamente motivados para gerar padrões de veias de folhas (RUNIONS et al., 2005). No mesmo período foi introduzida uma modelagem 3D explícita das veias como um fator inicial que define a forma da folha. Nesse trabalho também é abordada a variação de formas e cores nas folhas (HONG; SIMPSON; BARANOSKI, 2005).

Na modelagem de flores, foi apresentado um modelo que utiliza restrições biologicamente motivadas para construção de formas mais realistas (IJIRI et al., 2005). Posteriormente, o mesmo grupo ataca o problema de forma dinâmica, que permite a modelagem do ciclo completo do crescimento de uma flor, do botão até a flor adulta (IJIRI et al., 2008). Na Figura 2.5 pode ser vista a modelagem do crescimento de uma flor.

Uma área muito ativa é a modelagem da parte interna de frutas e verduras. Por exemplo, Owada e colegas apresentam um sistema interativo para modelagem da superfície e do interior de frutos (OWADA et al., 2004), no qual, a partir de um conjunto de imagens,



Figura 2.5: Exemplo de modelagem do ciclo de crescimento de uma flor (IJIRI et al., 2008).

é possível realizar cortes arbitrários sobre um objeto e as novas informações são sintetizadas por meio de técnicas de síntese de textura. Já Pietroni e colegas usam imagens reais como entrada para um sistema de referência local de um modelo 3D (PIETRONI et al., 2007). A partir das imagens de entrada é possível realizar cortes arbitrários ou até mesmo esculpir o objeto virtual. Mais tarde, alguns pesquisadores criam um conteúdo interno 3D a partir de esboços 2D de seções transversais, definidos pelo usuário, que se propagam no espaço 3D (OWADA et al., 2008). Outros definem a estrutura interna colando repetidamente exemplares de textura sólida (TAKAYAMA et al., 2008). Mais recentemente, as superfícies de difusão foram introduzidas, onde representações ilustrativas internas de algumas frutas e vegetais são possíveis (TAKAYAMA et al., 2010). Em vez de usar uma solução volumétrica 3D, foi aplicada uma versão modificada do algoritmo de coordenadas de valor médio positivo para difundir as cores de superfícies próximas dentro do objeto. Na Figura 2.6 podemos observar alguns resultados obtidos desses trabalhos.



Figura 2.6: Exemplo de modelagens de interiores de objetos (TAKAYAMA et al., 2008).

### 2.1.1 Modelagem de Padrões

A modelagem de padrões foi foco de alguns dos primeiros trabalhos da computação gráfica no Reino Vegetal, como o trabalho desenvolvido por Yessios, no final dos anos 70, o qual discute e ilustra algoritmos computacionais que geram representações gráficas de padrões de alguns materiais, entre esses, padrões de madeiras e cascas de árvores, além de outros, como padrões de muros de pedras (YESSIOS, 1979). A maior parte dos algoritmos discutidos nesse trabalho são baseados em técnicas que introduzem perturbações geradas aleatoriamente em padrões regulares previamente fornecidos. Na Figura 2.7 podemos observar alguns resultados.

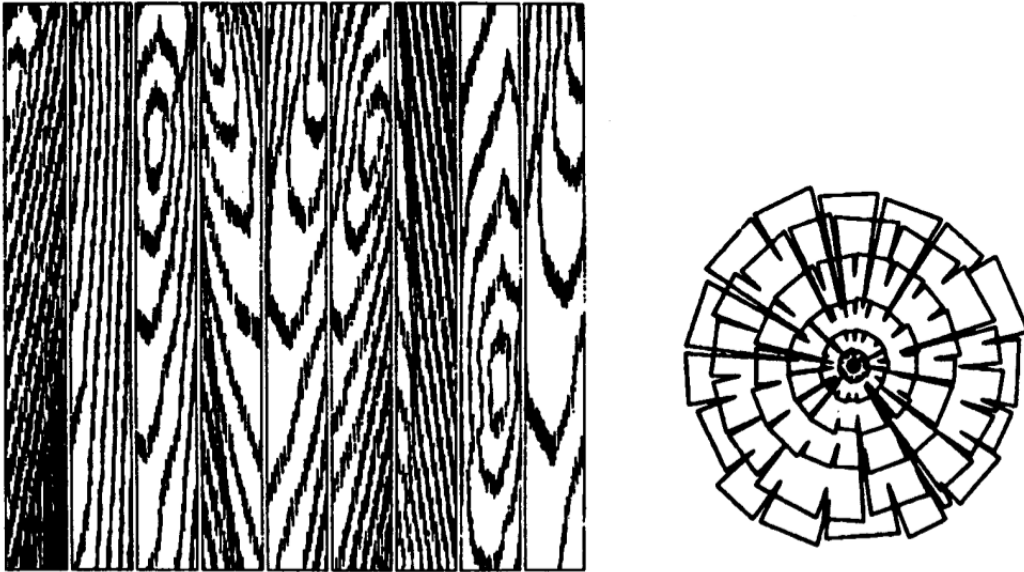


Figura 2.7: Resultados de padrões de madeira apresentados por Yessios (YESSIOS, 1979).

Na mesma época, Vogel foi um dos primeiros a trabalhar com computação gráfica com foco na criação de flores, embora não tenha sido publicado em uma conferência de computação gráfica (VOGEL, 1979). Segundo ele, a flor do girassol ou, mais especificamente, o padrão das sementes de um girassol pode ser aproximadamente construído por meio do método de Davis e Mathai. Essa construção reflete, além dos arcos de espirais conhecidos, dois tipos de irregularidades, um dos quais é observado nos padrões naturais do girassol, enquanto o outro não. Desse modo ele propôs um formalismo matemático de construção mais pertinente, que prevê todo o padrão, incluindo as irregularidades que são vistas na natureza, e apenas essas, evitando o segundo tipo de irregularidade. Podemos observar na Figura 2.8 uma ilustração do resultado obtido nesse trabalho.

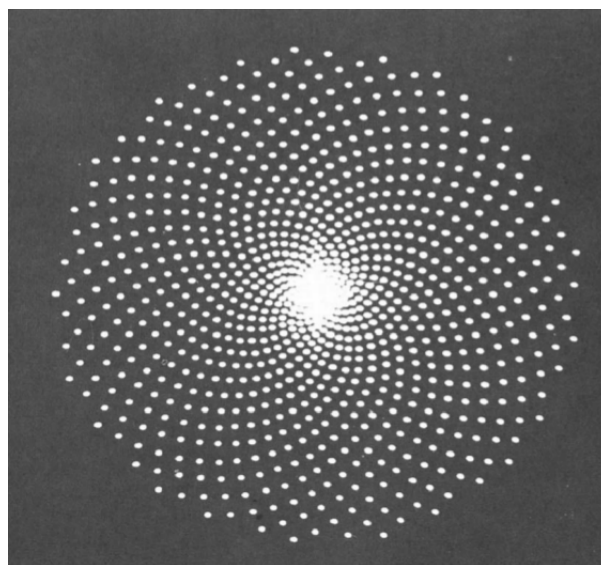


Figura 2.8: Projeção do resultado matemático de uma flor de girassol obtido por Vogel (VOGEL, 1979).



Viennot e colegas introduziram um conceito de matriz de ramificação de uma árvore, definindo assim uma certa medida da forma de uma árvore ou de um padrão da ramificação (VIENNOT et al., 1989), o qual é construído a partir de um algoritmo de geração de árvore aleatória que possui como matriz de ramificação uma dada matriz estocástica arbitrária triangular. Na Figura 2.9 podemos observar dois exemplos de padrões de ramificações apresentados nesse trabalho.



Figura 2.9: Exemplos de padrões de ramificações apresentados por Viennot (VIENNOT et al., 1989).

Em meados de 2002 foi apresentado um sistema de transporte de partículas para a modelagem de padrões de veias (RODKAEW et al., 2002). Partículas dispersas aleatoriamente no interior de uma determinada forma dirigem-se em direção a um alvo, a partir de uma regra de transporte, combinando-se em determinada proximidade. As trilhas do movimento das partículas são usadas para gerar os padrões de veias, como pode ser visto na Figura 2.10 um resultado desse processo. Em trabalho posterior, (RODKAEW; CHONGSTITVATANA; SIRIPANT, 2004) propôs a difusão da cor com o movimento dessas partículas, onde as cores misturadas geram padrões em formas de mármore, como podemos ver na Figura 2.11.



Figura 2.10: Padrão de veias gerados a partir de um Sistema de Transporte de Partículas (Esquerda: folha real; Centro/Direita: resultados obtidos por meio do modelo) (RODKAEW et al., 2002).

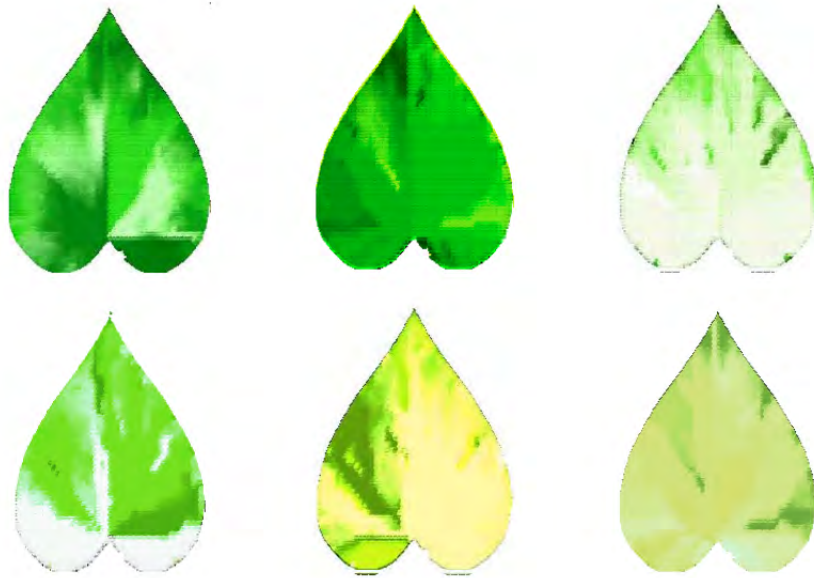


Figura 2.11: Padrões de cores obtidas a partir do movimento de partículas (RODKAEW; CHONGSTITVATANA; SIRIPANT, 2004).

Posteriormente, Runions e sua equipe introduziram uma classe de algoritmos motivados na Biologia para gerar padrões de veias de folhas (RUNIONS et al., 2005). Esses algoritmos simulam a interação entre três processos: o desenvolvimento de veias relacionadas as fontes de hormônio (auxina) incorporadas na lâmina foliar; a modificação da distribuição das fontes de hormônios pela proximidade das veias; e a modificação dos padrões das veias e da distribuição das fontes pelo crescimento das folhas. Para isso mantém uma estrutura de grafo conexo, que determina as veias e também seus tamanhos, e os algoritmos são baseados em parâmetros que definem o tipo de padrão de veias a ser gerado, e no uso de subdivisões do espaço por meio de diagramas de Voronoi e interações. Nas Figuras 2.12 e 2.13 pode-se observar alguns exemplos de padrões de veias gerados a partir desse modelo.

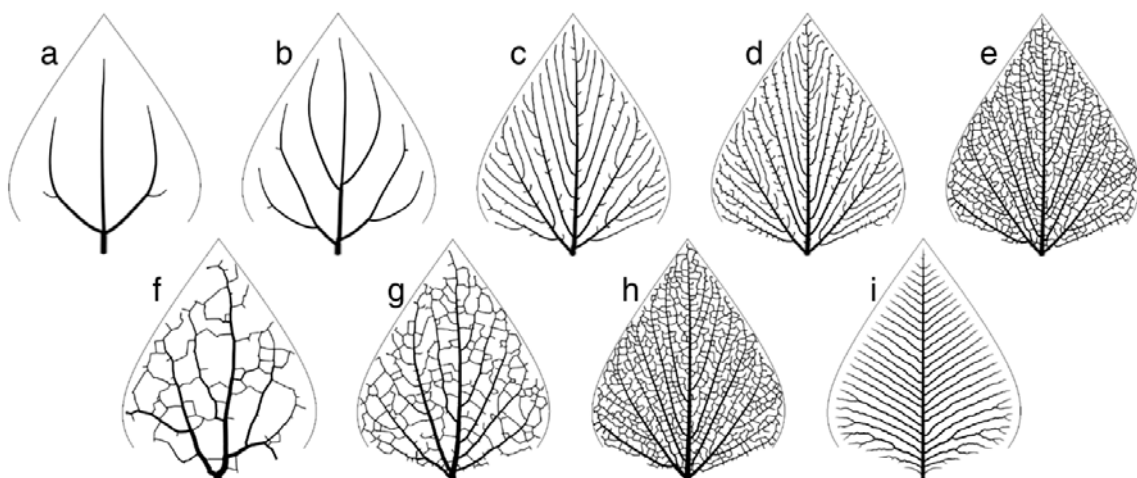


Figura 2.12: Exemplos de possíveis padrões de veias gerados a partir do modelo apresentado pela equipe de Runios (RUNIONS et al., 2005).



Figura 2.13: Exemplo de padrões de veias (RUNIONS et al., 2005).

Já Zhou e colegas investigaram padrões de cores de flores, onde utilizaram um sistema de Reação-Difusão para modelar padrões básicos em escala de cinza (Figura 2.14 - esquerda) que são posteriormente traduzidos em cores (Figura 2.14 - direita), utilizando um banco de dados de pigmentos (ZHOU et al., 2007).



Figura 2.14: Exemplos padrões de cores de flores gerados por Reação-Difusão (Esquerda: resultados em escala de cinza; Direita: resultados traduzidos em cores) (ZHOU et al., 2007).

## 2.2 Discussão

Neste capítulo apresentou-se alguns dos principais trabalhos da Computação Gráfica com foco na modelagem e síntese de fenômenos do Reino Vegetal, particularmente publicações com ênfase em padrões. Como pode-se observar, principalmente por meio das tabelas nas Figuras 2.1 e 2.2, apesar da grande gama de pesquisas realizadas nessa área, apenas uma pequena parte dessas tem alguma abordagem em comum com síntese de padrões visuais do Reino Vegetal, mostrando assim, o potencial de exploração investigativa nesse âmbito.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados primeiramente uma breve descrição dos fundamentos biológicos referentes aos padrões de cores existentes no Reino Vegetal, classificando-os para uma melhor abordagem dos mesmos neste trabalho. Em seguida, apresentaremos uma descrição formal do funcionamento do modelo procedural MClone, ou Modelo Mosaico de Clones, abordando suas principais funcionalidades, utilizadas durante o desenvolvimento deste trabalho, e exemplificando alguns resultados já obtidos a partir desta técnica no âmbito do Reino Animal.

#### 3.1 Fundamentos Biológicos

Padrões visuais no Reino Vegetal são ubíquos. Desde magníficos detalhes em muitas flores até mesmo em simples listras ou manchas, a faixa de variação é surpreendente. Um estudo mais sistemático dos padrões visuais no Reino Vegetal e sua modelagem em Computação Gráfica implica algum tipo de organização na variedade dos padrões. Na ausência de uma classificação padrão da literatura, propomos a seguinte classificação, com base nos aspectos visuais dos padrões.

##### 3.1.1 Possível classificação dos padrões visuais no Reino Vegetal

Propomos classificar os padrões visuais como estruturados, parcialmente estruturados ou não estruturados.



Figura 3.1: Padrão estruturado, parcialmente estruturado e não estruturado no Reino Vegetal.

Os padrões *estruturados* apresentam características regulares que permitem quantificar um ou mais elementos visuais, tais como o número de listras ou número de manchas. Padrões *parcialmente estruturados*, de modo similar aos padrões estruturados, apresentam características regulares, como a localização ou direção das manchas ou listras, porém não quantificáveis. Por outro lado, padrões *não estruturados* não tem uma forma

regular, ou seja, não possuem características proeminentes de quantificação ou posição do padrão, havendo grandes variações individuais.

Na Figura 3.1 exemplificamos essas possibilidades. A abóbora poliana apresenta um número regular de listras e o coléus apresenta manchas regulares, variando sempre do início à extremidade da folha, enquanto que a begônia mostra um padrão de manchas brancas que desafia uma descrição quantitativa e de localização. A maioria dos padrões são definidos com apenas duas cores básicas, embora mais cores sejam possíveis.

Na Figura 3.2 podemos observar inúmeros exemplos de padrões visuais de folhas, tanto com listras, quanto com manchas, desde estruturados a não estruturados. Apesar deste trabalho ter como foco inicial a geração de padrões visuais de folhas, entendemos que algumas das soluções possam ser aplicadas para outros padrões do Reino Vegetal, como por exemplo pétalas de flores, ilustradas na Figura 3.3, onde muitos padrões seguem estruturas próximas das existentes em folhas.



Figura 3.2: Exemplos de padrões visuais de folhas.

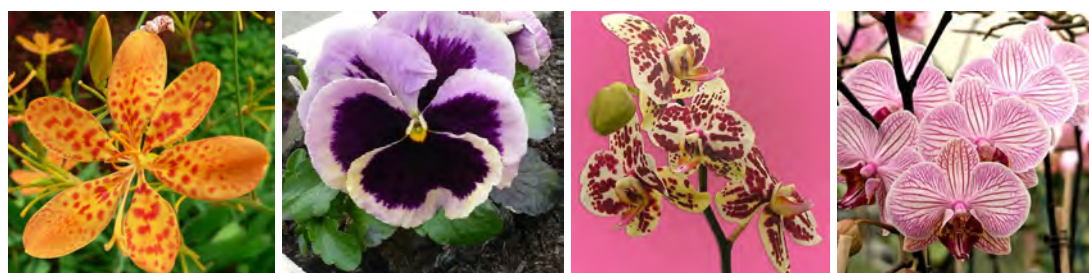


Figura 3.3: Exemplos de padrões visuais de flores.

### 3.1.2 Pigmentos de plantas

O reino vegetal apresenta uma maior diversidade de pigmentos, quando comparados com os mamíferos. Considerando que, para os mamíferos são apenas dois pigmentos responsáveis pela diversidade visual da cor, nas plantas existem quatro tipos principais: as antocianinas, betalaínas, carotenóides e clorofilas (HOPKINS, 2003) (GROTEWOLD,

2006). Pigmentos vegetais são compostos especiais que absorvem a luz de certos comprimentos de onda e refletem outros. Eles são responsáveis pela grande variedade de cores e padrões vistos em muitas espécies do Reino Vegetal. Os padrões coloridos atuam como atratores de animais para polinização e sementeira e, principalmente clorofilas e carotenóides, fazem parte do processo de fotossíntese.

A *clorofila* é o pigmento principal nas plantas, que absorve os comprimentos de onda amarelos e azuis, refletindo primariamente a cor verde predominante. Tem papel fundamental no processo de fotossíntese.

Já os *carotenóides* são vermelhos, laranja ou amarelos. São pigmentos acessórios no processo de fotossíntese, absorvendo comprimentos de onda não absorvidos pela clorofila. O caroteno é o pigmento mais usual desta família, de cor alaranjada, encontrado, por exemplo, em cenouras, seguido de luteína de cor amarela e licopeno, responsável pela cor vermelha em tomates.

*Antocianinas* são pigmentos flavonoides, solúveis em água, que podem variar de vermelho a azul, dependendo do pH. A Cianidina, por exemplo, apresenta-se vermelha em soluções ácidas, violeta em soluções neutras e azul em soluções alcalinas. Eles são mais presentes nas pétalas de flores, e são também responsáveis pela cor púrpura encontrada na parte ventral de algumas plantas, num processo onde a luz atravessa a folha e é refletida de volta em regiões com clorofila, a fim de maximizar o uso da luz.

Finalmente, as *betalaínas* também produzem as cores vermelho e amarelo, mas são apenas encontradas nas plantas da família *Caryophyllales*. As betalaínas são responsáveis, por exemplo, pela cor vermelho profundo das beterrabas, e utilizadas como agentes para dar cor aos alimentos.

Na Figura 3.4, mostramos exemplos de antocianinas, betalaínas e carotenóides, respectivamente.

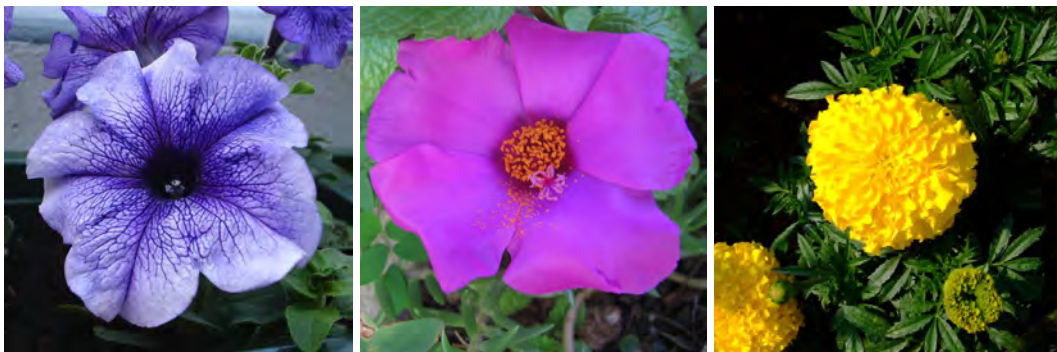


Figura 3.4: Exemplos de pigmentos: antocianinas, betalaínas e carotenóides.

Apesar desse conhecimento, foram utilizadas cores obtidas a partir de fotos de objetos reais para a renderização dos padrões deste trabalho. Essa abordagem foi usada porque nesse momento houve uma concentração maior dos esforços na distribuição do pigmento e não na formação do mesmo.

### 3.1.3 Formação de padrões no Reino Vegetal

No que diz respeito aos vegetais, são raros os estudos que tentam explicar a formação do padrão visual desenvolvido na superfície externa, apesar da genética relacionada ser bem conhecida (GUSMINI; WEHNER, 2005).

Uma exceção foi o estudo de Korn sobre padrões estriados encontrados, entre outros, na melancia (KORN, 2007). Nele Korn especula que o modelo Mosaico de Clones

(MClone) (WALTER; FOURNIER; REIMERS, 1998) é um candidato a explicar os padrões estriados de melancias. Korn enumera três razões pelas quais estes padrões podem ser considerados clones e, portanto, candidatos a serem explicados pelo MClone: as células são contíguas; são encontradas frequentemente em pares de mesmo tamanho e o reticulado verde-escuro, encontrado na superfície, pode ser visto como procedente de células individuais que se reproduziram dentro de uma área poligonal.

Neste trabalho consideramos essa possibilidade e temos como objetivo explorar o modelo MClone como um gerador de padrões para vários tipos de padrões visuais estruturados, parcialmente estruturados e não estruturados do Reino Vegetal.

### 3.2 MClone

Em 1992 um trabalho sobre modelagem de conchas marinhas mostrou que, para alguns casos, uma abordagem integrada à geometria para a geração da textura não é apenas desejável, mas também necessária. Os impressionantes resultados visuais das conchas marinhas apresentadas por Fowler e colegas deixaram poucas dúvidas sobre a eficiência de uma abordagem integrada (FOWLER; MEINHARDT; PRUSINKIEWICZ, 1992). Nesse trabalho, forma e textura foram sintetizados ao mesmo tempo. Isto somente foi possível porque tanto a forma das conchas, representadas como curvas paramétricas, e as texturas utilizando Reação-Difusão, foram inequivocamente expressas como funções do tempo. O fator de integração utilizado foi tempo.

Em 1998 Walter e colegas estenderam para o Reino Animal as principais ideias presentes no trabalho de Fowler (WALTER; FOURNIER; REIMERS, 1998). Eles desenvolveram e implementaram um modelo biologicamente plausível, chamado *Mosaico de Clones* ou *MClone*, para explicar os padrões de pelagem de alguns mamíferos, particularmente com pelagem típica amarelo-marrom, tais como os grandes felinos e a girafa. O modelo simula o comportamento celular do que seria o pré-padrão a ser expresso na pelagem. Vários parâmetros como taxa de mitose, adesão entre células, e mutação de células, entre outros, dão ao modelo uma expressabilidade muito grande.

Além das simulações bidimensionais, o modelo foi utilizado sobre uma malha poligonal que se modifica dinamicamente, tais como a de um animal crescendo. O padrão final obtido desta forma foi afetado por uma forma em mudança que utilizou dados reais de crescimento do animal para direcionar e controlar o mecanismo de formação de padrões (WALTER; FOURNIER, 1997). O método foi validado por um estudo-de-caso para girafas (Figura 3.5) e mostrou que uma abordagem integrada, além de ser um método alternativo aos algoritmos existentes, permite resultados visuais satisfatórios sem os problemas usuais de mapeamento de texturas.

Mais recentemente, Queiroz estendeu este modelo de modo a reproduzir também os padrões existentes em alguns animais de pelagem tipicamente preta e branca, como zebras e algumas espécies de bovinos e cavalos (QUEIROZ; WALTER, 2012). Na Figura 3.6 podemos observar alguns padrões obtidos.

O modelo MClone já foi considerado um forte candidato a explicar uma ampla gama de padrões visuais na Natureza (MURRAY, 2003), tendo já sido demonstrada sua flexibilidade no Reino Animal e poder para síntese de vários padrões, alguns ilustrados nas Figuras 3.5 e 3.6.



Figura 3.5: Resultados obtidos por meio do MClone: Girafa (esquerda), Leopardo (centro) e borboleta (direita).



Figura 3.6: Resultados obtidos por meio do MClone: Vaca (esquerda), Zebra (centro) e Cabra (direita).

### 3.2.1 Definição Geral do MClone

O princípio de modelagem do MClone utiliza o conceito de células interagindo para formação de um padrão celular. O número de tipos de células no sistema é dependente do padrão a ser modelado, mas, na prática, pequeno. Desse modo, o modelo MClone nos permite trabalhar com três tipos de células, as quais dividiremos como primeiro plano ( $F$ ), fundo ( $B$ ) e plano intermediário ( $M$ ). Porém, mesmo sendo as variações de cores no Reino Vegetal bem amplas, limitaremos a trabalhar basicamente com dois tipos de células,  $F$  e  $B$ .

A síntese de um determinado padrão é feita por meio de dois processos principais: a inicialização e a simulação. A inicialização é responsável pela distribuição das células no domínio da simulação (2D ou 3D) e a atribuição de um tipo para cada uma delas. Já a simulação é quem define o resultado final do padrão, por meio de movimentação, divisão e mutação das células. As células são modeladas como pontos para fins de computação. Para transformar as células em um mosaico na superfície, é calculado o diagrama de Voronoi de todos os pontos do objeto, colorindo cada polígono com sua respectiva cor, de acordo com seu tipo de célula.



### 3.2.1.1 Inicialização

Um determinado número de células iniciais ( $C_i$ ), especificado pelo usuário, é distribuído aleatoriamente na superfície do objeto. A posição inicial destas células é determinada por uma função de distribuição uniforme aleatória. Cada célula é criada com um tipo ( $T$ ) associado com o qual se relaciona ( $F$ ,  $B$  ou  $M$ ). O tipo de cada célula pode ser tanto definido aleatoriamente, como pode ser definido pelo usuário. Na Seção 3.2.3 detalharemos um meio do usuário auxiliar na definição dos tipos das células.

O tipo de uma célula define o seu comportamento no sistema. As propriedades associadas a cada tipo de células são: cor, taxa de divisão, probabilidade inicial para que a célula seja de um tipo particular, a probabilidade da célula mudar para outro tipo (mutação) e adesão. sendo que as probabilidade de mutação e adesão são definidas para cada par de tipos de células. Um resumo destes atributos é dado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Atributos definidos para cada tipo ou par de tipos de células.

Atributo	Significado	Tipo
Cor	Atributo em RGB que define a cor da célula.	3 floats [0-1]
Taxa de Divisão ( $D_T$ )	Define o tempo entre as divisões das células do tipo $T$ . Controla a quantidade de células de acordo com o tempo de execução.	float
Probabilidade Inicial	Probabilidade de uma célula ser inicialmente de um determinado tipo.	float [0-1]
Probabilidade Mutação	Probabilidade de uma célula mudar de tipo.	float [0-1]
Adesão ( $\alpha_{TT}$ )	Atração entre os tipos $T$ . Controla a tendência das células do tipo $T$ de ficarem juntas.	float [0-1]

As células passam por um processo de relaxamento inicial ( $\rho_i$ ), a fim de obter uma configuração espacial mais regular e estável. Para alcançar esta configuração, cada célula move-se o mais longe quanto possível das demais a partir de todos os seus vizinhos. Apenas as células dentro de um dado raio repulsivo são consideradas vizinhas. Este raio repulsivo é calculado a partir da área disponível ideal para cada célula e um fator de escala  $\omega_r$ , determinado pelo usuário. Na Figura 3.7 pode-se perceber o resultado desse processo. Na imagem da esquerda, tem-se um exemplo da distribuição inicial e aleatória das células. Já na imagem da direita, pode-se ver a distribuição dessas células após o processo de relaxamento.

O parâmetro de adesão ( $\alpha_{TT}$ ) entre os tipos de células  $T$  controla a força pela qual as células se repelem durante os passos de relaxamento. Esta força é proporcional a  $(1 - \alpha)$ , onde  $\alpha = 1$  significa que não há repulsão entre as células. Com este parâmetro, podemos forçar a quaisquer dos tipos de células que permaneçam fortemente ou fracamente ligadas. O papel do fator de adesão é definir qual a facilidade de deslocamento de uma célula, relativamente a uma propriedade de um par de células próximas.

Os deslocamentos individuais em  $x$  e  $y$  são calculados proporcionalmente à força escalar repulsiva ( $\omega_d$ ) e ao fator de adesão ( $\alpha_{TT}$ ), isso em relação às células da vizinhança. O tamanho da célula é influenciado através da introdução dessa força de repulsão entre

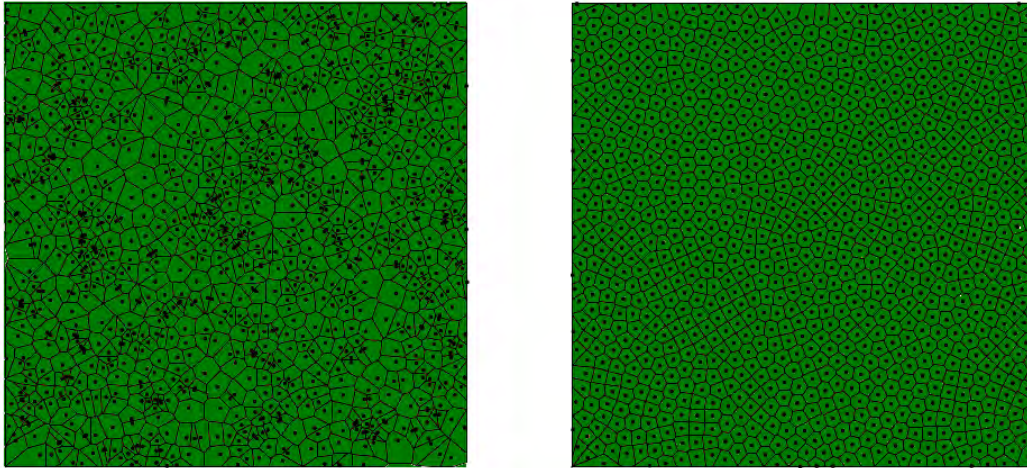


Figura 3.7: Exemplo de distribuição de células sem (esquerda) e com (direita) relaxamento inicial ( $\rho_i$ ) (WALTER; FOURNIER; REIMERS, 1998).

as células, da distância entre elas e da adesão. A direção do movimento das células pode ter outras influências além do fator de adesão entre as células vizinhas. Um desses fatores será descrito na Seção 3.2.4.

O processo de inicialização termina assim que os passos de relaxamentos iniciais ( $\rho_i$ ) definidos pelo usuário forem atingidos. O sistema prossegue então para a fase de simulação. A definição do momento exato para parar o passo de inicialização não é crucial, pois as células continuam a relaxar durante a etapa de simulação.

### 3.2.1.2 Simulação

A fase de simulação controla a evolução ao longo do tempo, a partir da distribuição inicial de células, para o padrão final. Este tempo, definido pelo usuário, pode ser interpretado como sendo a quantidade de dias de simulação, onde, a cada dia de simulação é executada uma sequência de eventos. Durante esta fase há dois eventos possíveis, os quais são relaxamento e divisão. Normalmente, ocorrem muitos eventos de relaxamento uniformemente espaçados e alguns eventos de divisão esparsos.

A taxa de relaxamentos durante a simulação é definida pelo usuário ( $\rho_s$ ). Para cada passo de tempo, que chamaremos de dia, ocorrem  $\rho_s$  eventos de relaxamento. A ideia e o funcionamento desses relaxamentos é o mesmo explicado na fase de inicialização, com o objetivo de definir a localização das células ao longo do tempo, tanto as já existentes, quanto as células novas que vão sendo criadas durante o processo de simulação. A relação entre a taxa de relaxamento e a taxa de divisão é a relação entre o movimento das células e da subdivisão das mesmas. Um valor grande para  $\rho_s$  permite um tempo maior para as forças de relaxamento equilibrarem as células ao longo do domínio.

Durante o evento de divisão uma célula se divide em duas, ou seja, elas sofrem mitose. Podemos pensar nelas como células pai e filha. A célula filha pode ser de um tipo diferente do que seu pai, com base na matriz de probabilidade de mutação definida como parâmetro. A nova célula herda todos os atributos correspondentes ao tipo que for associado a ela. A posição desta nova célula é uniformemente aleatória dentro de um círculo de diâmetro escolhido arbitrariamente baseado no raio repulsivo centrado na posição da célula pai.

O tempo exato para a divisão de uma célula é dada por uma distribuição de Poisson com média igual a taxa de divisão de células ( $D_T$ ). A distribuição de Poisson modela

pequenas variações no tempo da mitose, caso contrário, todas as células seriam divididas ao mesmo tempo.

A simulação é considerada concluída após a execução de todos os dias da simulação definidos pelo usuário. Ao final desses passos, a partir das posições das células e dos tipos associados às mesmas, pode-se calcular o diagrama de Voronoi, gerando assim, o padrão propriamente dito.

### 3.2.2 Primitivas de Controle

Para cada parte de um objeto da simulação, o MClone permite a definição de um sistema de coordenadas cilíndricas ligadas a ele. O cilindro é posicionado de forma que engloba toda a parte do objeto que é controlada por ele, isto não é estritamente necessário, porém conveniente para o usuário. Estes cilindros são predefinidos pelo usuário e são projetados para que o objeto seja segmentado em grupos semânticos da geometria, os quais representam o objeto em uma estrutura de nível mais alto (cabeça, tronco e membros, por exemplo).

Em cada cilindro também é definido um par de linhas que controlam indiretamente a escala do mesmo. Cada linha é uma medida de comprimento entre dois pontos específicos do objeto. Na Figura 3.8 são mostrados dois exemplos de objetos com seus respectivos cilindros.

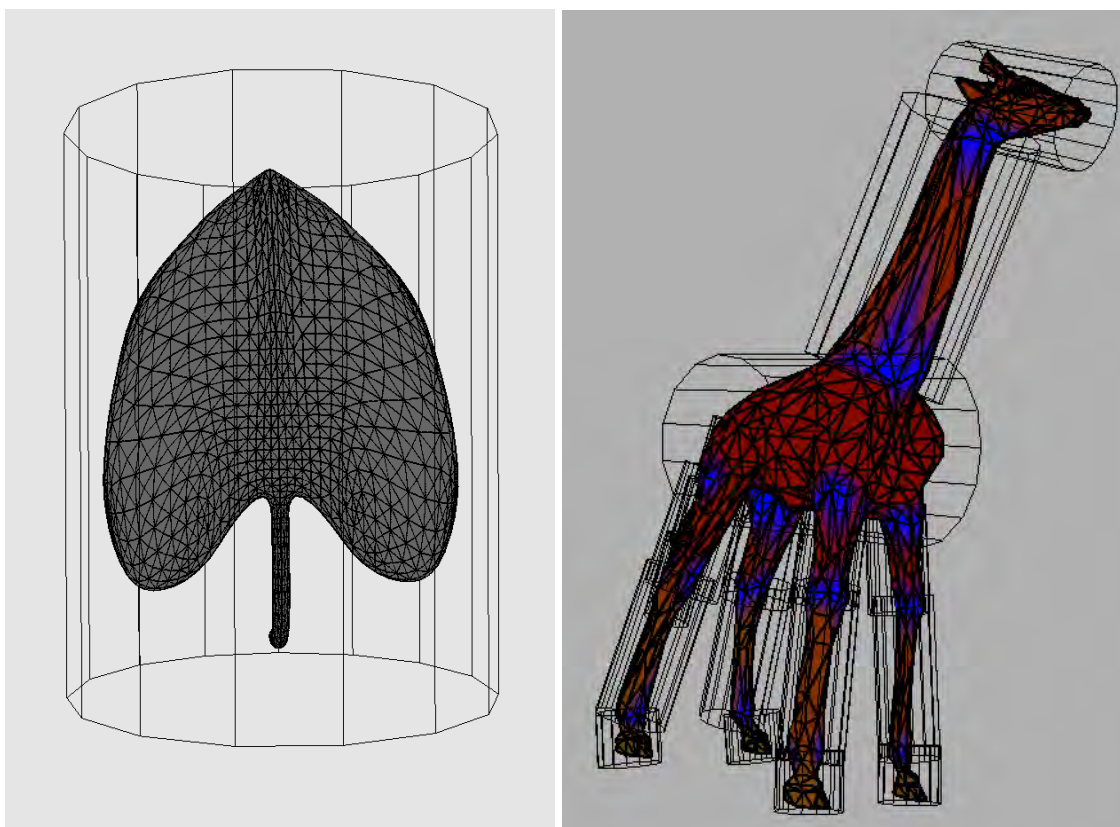


Figura 3.8: Objetos e seus respectivos cilindros.

Na imagem da esquerda da Figura 3.8, pode se ver um modelo de uma folha com um cilindro que o circunda como um todo. Nesse caso há a necessidade de apenas um cilindro devido a folha não possuir uma divisão na sua estrutura que exija mais de um cilindro. Porém, caso deseje-se modelar um conjunto de folhas simultâneas, cada folha

poderia ter seu cilindro de controle de modo a facilitar o controle de cada folha independentemente. Na imagem da direita, podemos observar um modelo mais complexo, temos um exemplo de um corpo de uma girafa, a qual possui 18 cilindros definidos, de modo a tratar cada parte do corpo separadamente (WALTER; FOURNIER; MENEVAUX, 2001). Neste modelo, as seções do corpo azuis são os triângulos que pertencem a mais de um cilindro.

Esta estrutura cilíndrica tem como objetivo auxiliar no controle de algumas características dos objetos e técnicas auxiliares no MClone. Dentre elas, a utilização de texturas, comentado com mais detalhes na Seção 3.2.3, e a utilização de crescimento do objeto. A simulação das características de crescimento dos objetos foi muito utilizada na geração dos padrões de pelagens dos animais (WALTER; FOURNIER; MENEVAUX, 2001), já no caso da geração dos padrões propostos aqui, não houve a necessidade de utilização desta ferramenta.

### 3.2.3 Textura

Como comentado na Seção 3.2.1.1, existem meios de influenciar a configuração inicial dos tipos de cada célula. Uma dessas técnicas é a utilização de texturas para mapear regiões que possam ou não ter um determinado tipo de célula na distribuição inicial.

Para isso, utiliza-se uma combinação das primitivas cilíndricas, descritas anteriormente, com imagens binárias. Estas imagens são utilizadas como parâmetro de controle indireto. Elas fornecem informações suficientes para controlar este recurso. A imagem binária que podemos observar, como exemplo, na parte superior esquerda da Figura 3.9, é mapeada sobre o cilindro que abrange a região da superfície que se deseja controlar. A ideia é que somente serão criadas células de primeiro plano ( $F$ ) nas áreas brancas da imagem e todas as demais áreas serão mapeadas apenas com células de fundo ( $B$ ).

As células são criadas de acordo com a probabilidade inicial original, sendo que as células localizadas na região branca da imagem permanecem com o tipo originalmente definido. Já as células criadas na região preta da imagem, independentemente do seu tipo original, são alteradas para o tipo  $B$  para se obter a configuração inicial desejada.

Na Figura 3.9 temos um exemplo de aplicação dessa técnica, onde deseja-se inserir células  $F$  (escuras nesse modelo) apenas em algumas regiões do objeto, formando assim, uma ideia inicial de listras, as quais ao longo da simulação gerarão o padrão desejado. Na parte superior à esquerda podemos visualizar a imagem da textura binária, a qual é aplicada no cilindro envolvendo o objeto, cilindro exibido na imagem superior direita. Desse modo, na criação de células inicial, são geradas células  $F$  apenas nas regiões brancas, gerando assim a formação de células exibida na imagem inferior. Neste exemplo usamos uma quantidade grande de células iniciais, cem mil células, e nenhum passo de relaxamento, apenas de modo a auxiliar a visualização da distribuição inicial.

### 3.2.4 Anisotropia

Conforme descrito na Seção 3.2.1.1, existem meios de influenciar a direção do movimento das células durante o processo de relaxamento, tanto durante a inicialização, quanto durante o processo de simulação. Um desses meios é a utilização de anisotropia definida por meio de um campo vetorial, o qual será descrito nesta seção.

Para cada uma das faces da malha um vetor  $\vec{v}$  é obtido por interpolação RBF usando uma função multiquadrática inversa de base radial (QUEIROZ; WALTER, 2012) a partir de vetores de controle especificados em algumas faces do objeto. A direção de  $\vec{v}$  define a direção preferencial do movimento das células, e por consequência influencia a direção

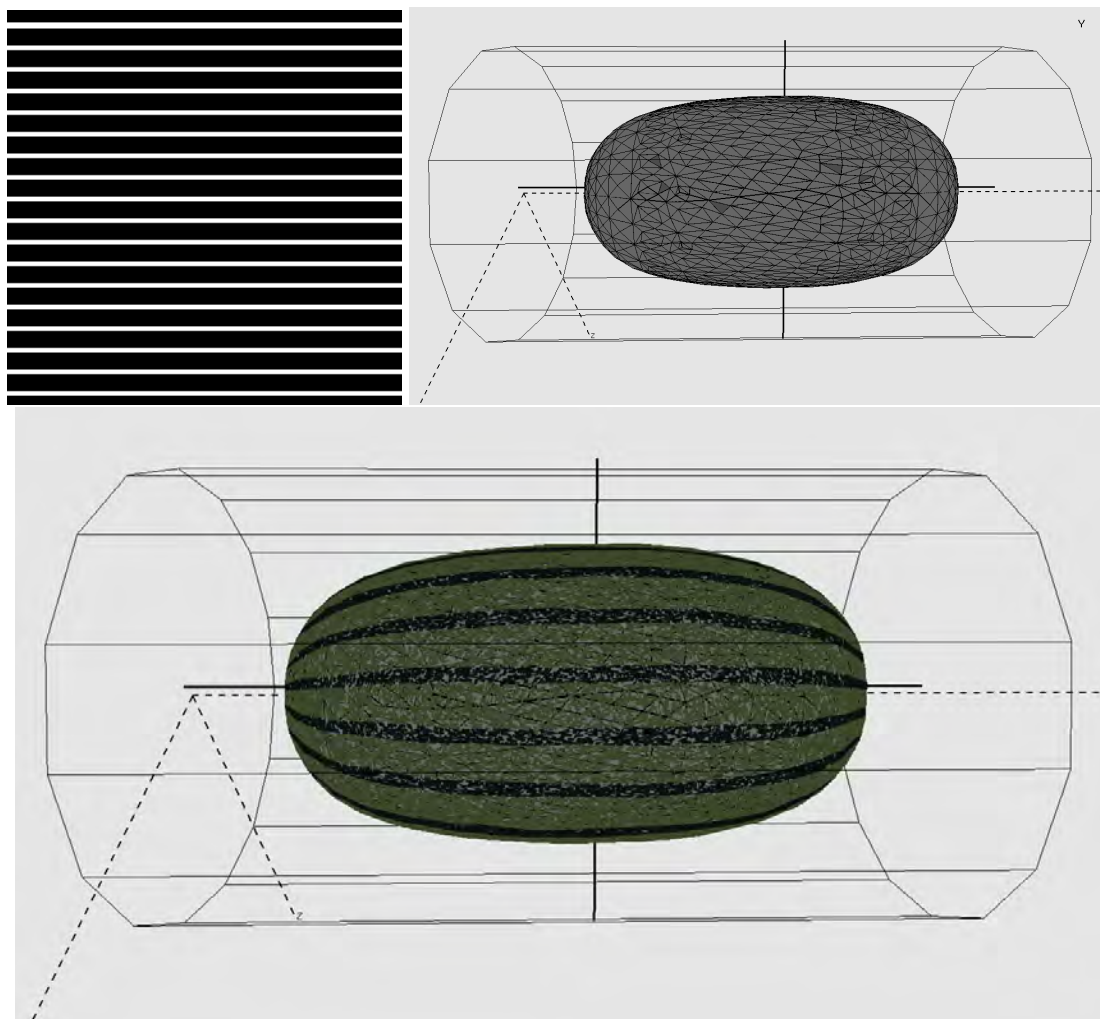


Figura 3.9: Exemplo de uma imagem binária de textura, cilindro ao qual a mesma é aplicada e resultado da criação das células iniciais no objeto, respectivamente.

da formação do padrão. Sem anisotropia as células se movem na direção determinada pelo processo de relaxamento. O parâmetro  $\omega_a$  controla a resultante de uma soma vetorial entre a direção calculada pelo relaxamento e a direção especificada pelo campo vetorial.

Na Figura 3.10 é ilustrado um campo vetorial gerado sobre a superfície de um objeto. Os vetores verdes, envolvidos com um círculo vermelho (imagem superior), são os vetores de controle definidos pelo usuário. Os vetores em vermelho são os vetores de cada face do objeto, interpolados pelo sistema, formando o campo vetorial (imagens inferiores).

Assim, a informação de anisotropia do padrão é definida utilizando este campo vetorial, onde a anisotropia para cada célula é calculada localmente de acordo com o vetor da face em que a mesma se encontra. Se uma célula move-se para uma outra face no processo de relaxamento, sua anisotropia é calculada de acordo com essa nova face, e assim sucessivamente. Portanto, o campo vetorial definido sobre a superfície pode mover uma dada célula em várias direções específicas, de acordo com a face, e não apenas numa única direção global. Esta abordagem permite uma grande flexibilidade na definição dos movimentos celulares ao longo da superfície, obtendo-se resultados visualmente mais semelhantes aos padrões reais encontrados na natureza.

De modo a auxiliar a visualização desse campo vetorial e consequente especificação, durante este trabalho foi implementado um sistema de coloração das faces de acordo com

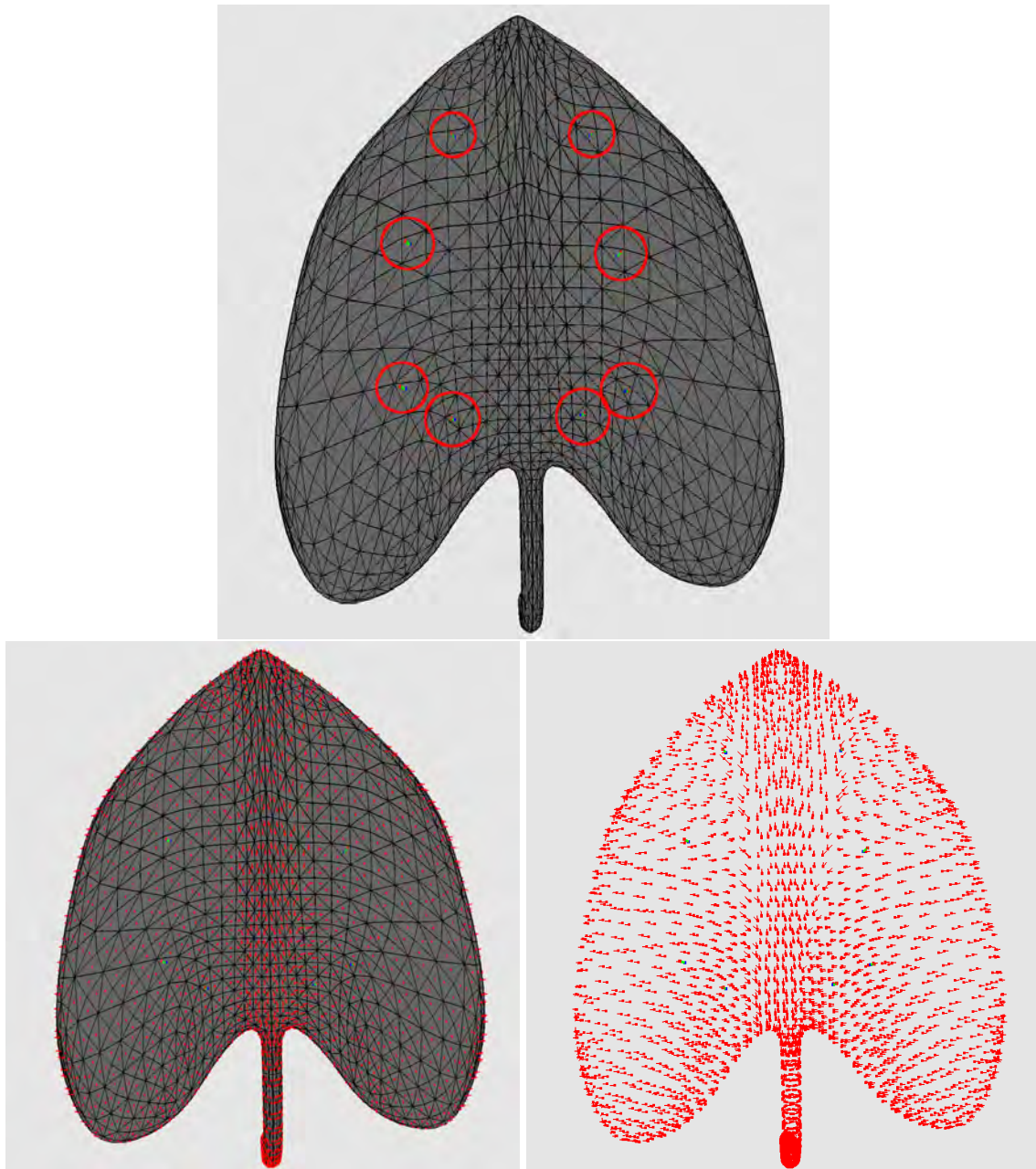


Figura 3.10: Vetores de controle informados pelo usuário (superior) e campo vetorial gerado a partir da interpolação dos vetores de controle (inferior).

a direção dos vetores presentes nas mesmas. Isto foi desenvolvido com base no sistema de cores HSV: *Hue* (matiz), *Saturation* (saturação) e *Value* (valor ou brilho).

A definição de  $H$  é calculada com base no ângulo formado entre o vetor presente na face e o sistema de coordenadas padrão do objeto. O usuário pode definir quais coordenadas ( $x$ ,  $y$  ou  $z$ ) deseja levar em consideração nesse cálculo, de modo a melhor visualizar o campo vetorial de acordo com a orientação do objeto.

Na Figura 3.11 podemos observar a visualização do campo vetorial com base no desenho dos vetores (esquerda), versus a demonstração dos campos vetoriais em forma de cores do sistema HSV (direita). Neste exemplo estamos levando em consideração para cálculo apenas a coordenada  $y$ , devido a orientação do objeto. A cor avermelhada representa os campos vetoriais mais próximos do eixo  $y$ , enquanto as faces tendendo ao

amarelo/verde, representam faces com vetores mais perpendiculares ao eixo  $y$ . Desse modo podemos observar fácil e rapidamente o resultado do campo vetorial como um todo.

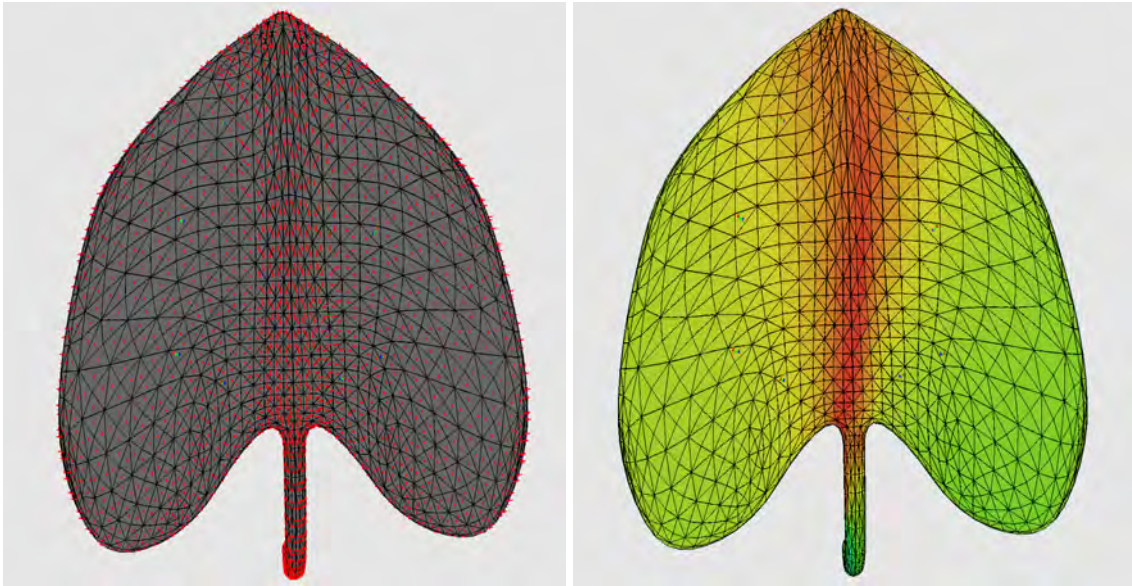


Figura 3.11: Campo vetorial do objeto representado por meio de desenho de vetores e por meio de sistema de cores HSV, respectivamente.

### 3.3 Discussão

Neste capítulo foi apresentada uma breve descrição biológica da pigmentação dos elementos do Reino Vegetal, juntamente com uma possível classificação dos padrões existentes nesse reino, seguido de uma formalização do funcionamento do modelo MClone.

A partir desta análise, juntamente com o trabalho de Korn (2007), podemos observar uma grande relação entre os padrões existentes no Reino Vegetal e o que é proposto a partir das técnicas do modelo procedural MClone, motivando assim, uma análise aprofundada desse modelo, de modo a gerar, além dos padrões do Reino Animal, uma grande gama dos padrões existentes no Reino Vegetal.

## 4 RESULTADOS

Para avaliar a flexibilidade e aplicabilidade do MClone para geração de padrões do Reino Vegetal, como foi proposto neste trabalho, foram selecionados alguns padrões como estudos-de-caso, os quais, na sua maioria, podem ser expandidos para outras espécies e variedades. Para isso, tentou-se abranger alguns padrões de cada uma das classificações descritas na Seção 3.1.1, que serão abordados nas seções seguintes. Alguns destes resultados foram apresentados em um artigo na conferência SIBGRAPI 2011, que ocorreu em Maceió, Alagoas, Brasil (BINSFELD; GAMBOA; WALTER, 2011), o qual está disponível no Anexo A.

Devido ao modelo MClone ser um sistema relativamente antigo, no qual muitos pesquisadores já trabalharam, apresentamos uma discussão sobre uma refatoração de código do mesmo, de modo a melhorar a organização e estabilidade do sistema.

### 4.1 Geração de Padrões do Reino Vegetal

Nesta seção apresentamos os resultados obtidos nos estudos-de-caso. Na Tabela 4.1 apresentamos os principais parâmetros utilizados para obter os resultados das figuras que relataremos a seguir. O resultado da simulação do MClone é a distribuição geométrica das células, obtida conforme descrito na Seção 3.2, as quais, representadas como polígonos de Voronoi, definem o padrão. Para colorir estes polígonos, cada tipo de célula tem atribuída uma cor RGB escolhida manualmente a partir de imagens do fruto ou da planta alvo.

A definição dos parâmetros de entrada para a execução do modelo MClone pode ser inicialmente considerada complexa. Um dos motivos é que há uma necessidade de ajustar esses valores de acordo com a geometria utilizada para a simulação, isso ocorre devido às possíveis variações existentes entre as geometrias, como escala, quantidade de faces e até mesmo a regularidade dessas faces. Outro fator que pode dificultar a escolha dos valores iniciais de execução, é definir a relação de cada parâmetro para o padrão que se deseja abordar.

Os parâmetros definidos na Tabela 4.1 foram resultados adquiridos ao longo do desenvolvimento deste trabalho. A definição destes valores, como descrito anteriormente, não é um processo trivial, porém tentaremos relatar brevemente os principais processos para o surgimento dos mesmos.

Os valores utilizados inicialmente para o processo de descobrimento dos parâmetros ideais para a geração de um determinado padrão, foram diretamente baseados em resultados obtidos anteriormente por meio do MClone. Foram analisados os resultados de trabalhos previamente publicados, como, por exemplo (WALTER; FOURNIER; REIMERS, 1998; WALTER; FOURNIER; MENEVAUX, 2001), e utilizados como entrada os parâmetros de padrões similares ou que pudessem estar mais próximos do desejado, iniciando-



Tabela 4.1: Principais parâmetros utilizados para a sintetização de padrões do Reino Vegetal utilizando o MClone.

<b>Figura</b>	<b>Dias</b>	$w_r$	$C_i$	$\alpha_{FF}$	$\alpha_{BB}$	$D_F$	$D_B$
Fig. 4.1	35	1.0	2000	0.5	0.8	10	10
Fig. 4.2	30	1.0	2000	0.5	0.8	10	10
Fig. 4.3	5-15-20-30	1.0	10000	0.5	0.8	5	10
Fig. 4.4	30	1.0	2000	0.5	0.8	10	10
Fig. 4.8	25	4.0	5000	0.5	0.9	3	60
Fig. 4.9	25	4.0	5000	0.7	0.9	3	60
Fig. 4.10	20 ... 32	2.0	10000	0.5	0.7	30	120
Fig. 4.12	23-27-30	2.0	10000	0.5	0.7	30	120
Fig. 4.13	25	3.0	5000	0.9	0.9	15	60
Fig. 4.14	30	1.0	3000	0.7	0.9	5	30
Fig. 4.15	20	3.0	6000	0.7	0.9	6-8-20	8
Fig. 4.16	20	1.0-2.0-3.0	10000	0.5	0.9	5	10
Fig. 4.17	20	0.5	10000	0.5	0.9	5	10
Fig. 4.18	20	0.5	10000	0.5	0.9	5	10
Fig. 4.19	15	0.7	15000	0.7	0.7	5	70

se assim, uma busca no espaço de valores com base nestes pivôs.

O processo de busca no espaço de valores possíveis foi diretamente guiado pelos conhecimentos da teoria do MClone, descritos na Seção 3.2. A partir de uma análise do resultado obtido com os parâmetros definidos, pode-se avaliar quais aspectos do padrão devem ser variados para atingir o resultado desejado. Com essa informação é possível verificar, de acordo com a teoria do MClone, quais os principais fatores que tem influência nesses aspectos. Efetuando variações nesses fatores vão sendo obtidos novos padrões e, a partir desses resultados, pode-se avaliar quais aspectos influenciam positiva ou negativamente. A partir da repetição deste processo é possível ir calibrando os resultados, até atingir o objetivo.

Devido ao campo de valores e de suas variações ser bem amplo, foi utilizado um *script* de modo a auxiliar na calibragem de cada parâmetro. Permitindo simular mais variações nos fatores desejados em um espaço de tempo menor e assim agilizar o processo de refinação do resultado final.

Apesar da complexidade para atingir os resultados desejados, após a definição de uma relação de parâmetros que geram um padrão próximo ao esperado, leves modificações nesses parâmetros nos permitem obter uma série de variações nos resultados muito interessantes. Em inúmeras aplicações, essas variações podem ser muito valiosas, como, por exemplo, na síntese de uma coleção de plantas ou frutos, onde há uma necessidade de variações entre os padrões sintetizados, não apenas as diferenças básicas existentes entre duas plantas da mesma espécie, mas também diferenças mais representativas, como, por exemplo, devido a influências do tempo, envelhecimento, ou até mesmo variações maiores existentes em uma mesma espécie. O desenvolvimento de *scripts* também pode ser útil para simular essas variações.

Outro fator importante de ser considerado, é o tempo de execução da simulação. Esse tempo possui uma grande variação de uma simulação para outra, variando de segundos a até mesmo muitos minutos. Os dois principais aspectos influenciadores no tempo do processamento da simulação são a geometria utilizada e a quantidade de células presentes

na simulação.

A geometria, tem como principais influências a resolução e a quantidade de faces, o que aumenta a complexidade dos cálculos nos passos de relaxamento. A quantidade de células na simulação, podendo ser gerada devido a taxa de células iniciais como também pela taxa de reprodução durante o processamento, tem grande influência devido há necessidade de movimentação de cada célula em cada passo de relaxamento, como também devido ao aumento da quantidade de células vizinhas, aumentando assim automaticamente o tempo de execução.

Além dos dois fatores descritos, os demais também podem ter grande influência, como, por exemplo, a taxa de relaxamento ou os dias de execução da simulação, porém estes acarretam em um crescimento linear no tempo de execução, sendo que os fatores descritos anteriormente, no pior caso, podem afetar exponencialmente o tempo de processamento.

A grande maioria dos resultados apresentados neste trabalho, tiveram seus tempos de execução variando de segundos, como as Figuras 4.1 e 4.10, à poucos minutos, como as Figuras 4.8 e 4.17. Apenas os resultados da Figura 4.19 levaram um tempo superior para execução.

De modo a exemplificar alguns tempos, os resultados apresentados nas Figuras 4.10 e 4.12 levaram na faixa de 20 à 40 segundos de execução, nos quais foram variados os dias de execução entre os resultados. As simulações exibidas nas Figuras 4.8 e 4.9 executaram no intervalo de 1 minuto e 30 segundos à 2 minutos e 30 segundos, levando em consideração as variações das taxas iniciais de células do tipo  $F$ . Já os padrões gerados na Figura 4.19, levaram na faixa de 25 à 30 minutos, esses resultados tiveram influência da geometria do objeto e principalmente pela necessidade inicial de uma grande quantidade de células juntamente com uma frequência de reprodução alta, isso foi necessário de modo a permitir a geração de um padrão com bordas mais regulares.

Todos estes tempos são com base em um computador com processador Intel® Core™ i5, CPU 480M, 2.67GHz x 4, 4GB de memória RAM DDR3 e placa de vídeo GeForce® 310M, com 512 MB de memória dedicada.

Para a renderização de algumas das imagens utilizadas para a demonstração dos resultados obtidos neste trabalho, foi utilizado o sistema Blender, um programa de animação gráfica e produção de vídeo. As imagens geradas por meio deste programa são as presentes nas Figuras 1.3, 4.1, 4.8, 4.10, 4.17, 4.18 e 4.19.

Nas seções seguintes, descrevemos cada um destes resultados, classificando-os nas categorias não estruturados, parcialmente estruturados e estruturados, conforme apresentado na Seção 3.1.1. De modo a melhor caracterizar as vantagens do modelo abordado aqui, faremos uma comparação com outras possíveis técnicas para geração de resultados não estruturados.

#### 4.1.1 Padrões Não Estruturados

Conforme já explicado, padrões não estruturados são aqueles que não possuem uma forma regular ou estruturas quantificáveis. Na Figura 4.1 podemos observar um desses casos, onde mostramos, lado a lado, um arbusto real, cientificamente conhecido como *Codiaeum Variegatum* e popularmente chamado de Cróton ou Folha-imperial, e um arbusto virtual, simulado a partir do modelo MClone. Podemos observar que a textura procedural produzida pelo MClone é visualmente semelhante ao padrão real.

Uma das vantagens dos modelos procedurais é o poder de gerar muitas variações individuais do mesmo padrão, como pode ser percebido na Figura 4.2, que ilustra esta



Figura 4.1: *Codiaeum Variegatum* real (esquerda) e simulação obtida a partir do MClone.

possibilidade com três padrões únicos da mesma espécie *C. Variegatum*, os quais compartilham exatamente os mesmos parâmetros de simulação, diferenciados apenas pelas células iniciais criadas pelo gerador aleatório e o decorrer dos passos da simulação.



Figura 4.2: Três variações individuais providas pelo MClone com base nos mesmos parâmetros de simulação.

A sequência da Figura 4.3 ilustra outra possível vantagem de uma técnica procedural com controle. Nós podemos seguir o desenvolvimento de um padrão no tempo, simulando um envelhecimento da planta. Nesta sequência, mostramos imagens da mesma simulação obtidas em dias sucessivos da simulação, de 5 a 30 dias. O padrão varia de quase completamente verde para quase todo amarelo, simulando o envelhecimento real dessa planta.

Ao ajustar o número de células iniciais de cada tipo de simulação, podemos variar de uma planta quase totalmente verde para uma quase totalmente amarela. A Figura 4.4 ilustra esta variação do padrão, nas quais, as probabilidades iniciais de células do tipo  $F$  foram dadas, respectivamente, por 0.9, 0.7, 0.5, 0.2 e 0.1 e de células do tipo  $B$  por 0.1, 0.3, 0.5, 0.8 e 0.9.

Como os padrões não estruturados são muito irregulares, foi investigado como poderiam ser gerados alguns dos resultados com o modelo procedural Perlin Noise. Embora seja verdade que alguns resultados poderiam de fato ser gerados dessa forma, percebemos algumas limitações nesse modelo que o nosso modelo não tem.

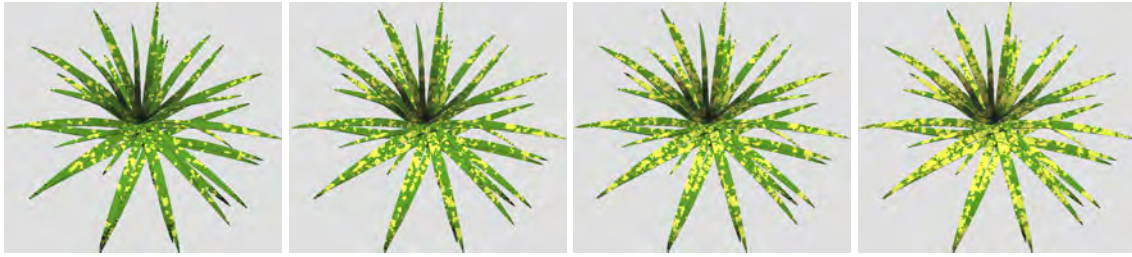


Figura 4.3: Envelhecimento de uma *C. Variegatum* com a passagem dos dias de simulação em uma mesma execução. Número total de dias variando entre 5, 15, 20 e 30, respectivamente.

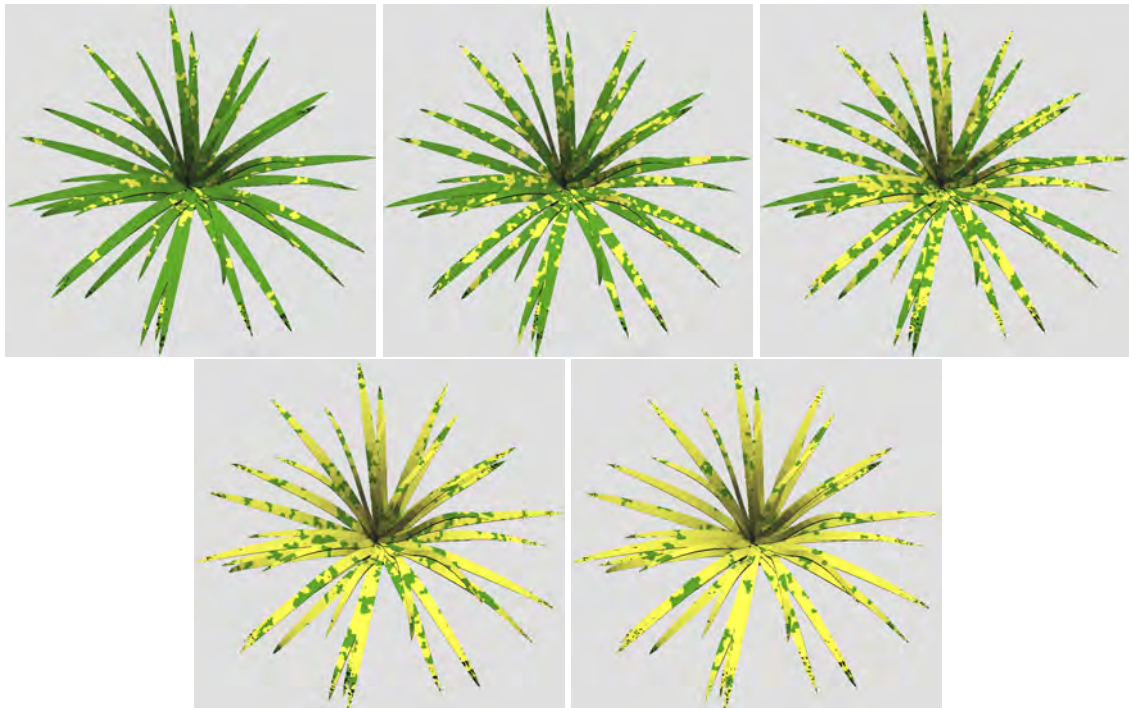


Figura 4.4: Variação de uma *C. Variegatum* quase toda verde a uma quase toda amarela. Probabilidades iniciais de células do tipo  $F$  dadas por 0.9, 0.7, 0.5, 0.2, 0.1.

A nossa abordagem é baseada em células o que permite um crescimento contínuo e coerente de um grupo de células, enquanto que com o modelo de Perlin Noise não temos um bom controle sobre o crescimento dos elementos. Este inconveniente é ilustrado nas Figuras 4.5 e 4.6.

Na Figura 4.5 temos um resultado aplicando o modelo de Perlin Noise tentando simular a evolução do padrão através do tempo, onde podemos perceber que o mesmo não mantém uma consistência no padrão após essa evolução. Já, comparando com o resultado da Figura 4.6, onde simulamos a evolução do padrão através do tempo usando o modelo MClone, podemos perceber que o grupo de células que definem uma mancha expande sua fronteira de forma consistente. Aumentar a escala do ruído de Perlin Noise não garante que áreas contíguas vão aumentar de forma consistente, como ocorre nos resultados do MClone.

Outro potencial inconveniente do modelo de Perlin Noise é a repetição de elementos. Na Figura 4.7 ilustra-se este problema, onde a mesma mancha amarela irregular se repete

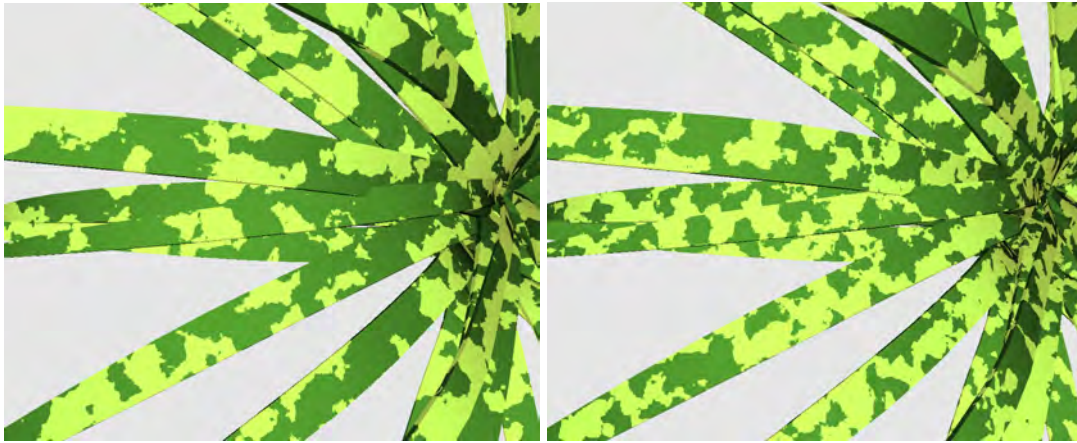


Figura 4.5: Resultado aplicando o modelo de Perlin Noise, tentando simular a evolução do padrão através do tempo. Compare essa evolução com o resultado da Figura 4.6.

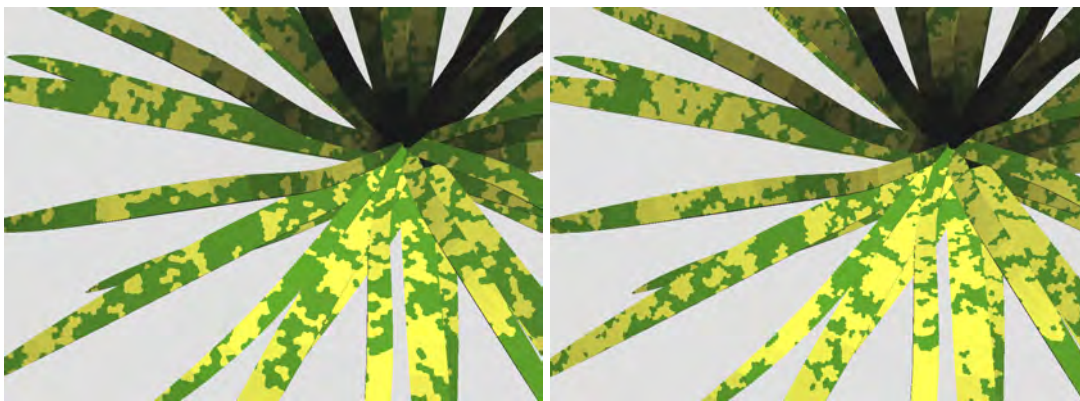


Figura 4.6: Simulação da evolução do padrão através do tempo usando o modelo MClone. Um grupo de células que definem uma mancha expande sua fronteira de forma consistente.

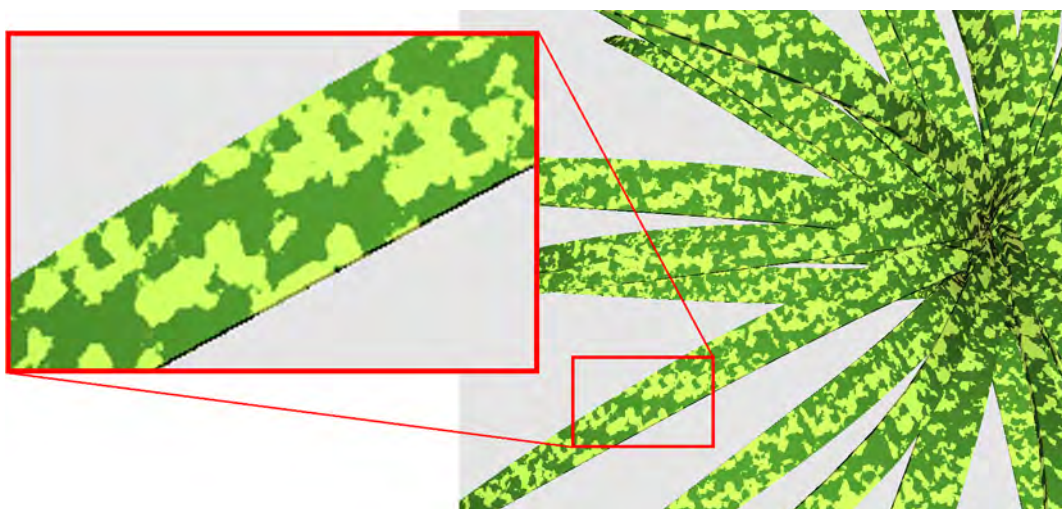


Figura 4.7: Repetições de elementos: potencial desvantagem da utilização do modelo de Perlin Noise nos tipos de padrões abordados neste trabalho.

pelo objeto. Este efeito é perturbador e altamente perceptível. Os padrões do MClone não mostram esse mesmo problema.

Como segundo exemplo de padrão não estruturado, temos o cactus brasileiro *Cereus Hildemannianus*, conhecido popularmente como Cacto Verde-e-Amarelo. Na Figura 4.8 podemos visualizar à esquerda uma imagem real dessa espécie, a qual possui inúmeras manchas aleatoriamente distribuídas na sua superfície. Na mesma figura, à direita, temos uma simulação desta espécie por meio do MClone, onde temos cinco exemplos, os quais são gerados com os mesmos parâmetros de entrada, variando apenas a probabilidade inicial das células  $F$  entre 0.1%, 0.2% e 0.3% e das células  $B$  entre 99.9%, 99.8% e 99.7%, respectivamente, o que faz ocorrer a variação do tamanho e quantidade de manchas na superfície do objeto.



Figura 4.8: Exemplos real (esquerda) e sintetizado (direita) de *Cereus Hildemannianus* variando a probabilidade inicial das células do tipo  $F$  de 0.1% à 0.3%.

Na Figura 4.9, à esquerda, temos outro exemplo de *Cereus Hildemannianus*, no qual apesar da aleatoriedade da localização de suas manchas, possui manchas mais uniformes, o que não impede a utilização do modelo MClone, como podemos perceber na imagem sintetizada à direita.

#### 4.1.2 Padrões Parcialmente Estruturados

Como definido anteriormente, padrões parcialmente estruturados apresentam características regulares, porém não quantificáveis. Desse modo, temos como exemplo o *Philodendron Oxycardium*, mais conhecido como Filodendro, que pode ser observado na Figura 4.10 à esquerda. Na mesma figura, à direita, temos um exemplo sintetizado a partir do MClone.

Para a síntese das folhas da Figura 4.10, foram utilizados um cilindro e uma textura, exibidos na Figura 4.11, de modo a controlar a criação inicial das células do tipo  $F$  apenas no centro da folha. A partir dessa distribuição inicial, durante o processo de simulação, foi utilizado um campo vetorial, demonstrado nas Figuras 3.10 e 3.11, para controlar o deslocamento das células nos passos de relaxamento, de modo que as mesmas se movam



Figura 4.9: Exemplo de *Cereus Hildemannianus* real (esquerda) e sintetizado (direita) com manchas mais uniformes.



Figura 4.10: Exemplo de uma planta *Philodendron Oxycardium* real (esquerda) e sintetizada pelo MClone (direita).

do centro para as extremidades da folha.

Devido a necessidade desse controle para a geração do padrão da folha da *P. Oxycardium*, por meio da textura e do campo vetorial, há a necessidade da geração do padrão

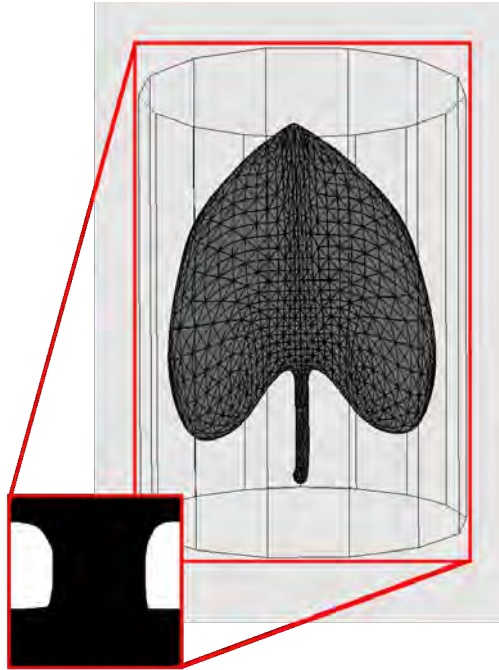


Figura 4.11: Cilindro e textura utilizados para a geração das folhas da planta *Philodendron Oxycardium*.

para cada folha separadamente. Outra maneira seria gerar esses padrões diretamente sobre o conjunto de folhas, porém haveria a necessidade de um cilindro de controle e um campo vetorial para cada folha da planta, o que geraria um grande trabalho manual para o usuário na criação destes cilindros e campos vetoriais.

Como já foi explicado anteriormente, cada execução do MClone com os mesmos parâmetros gera um estrutura ligeiramente diferente, seguindo um mesmo padrão. Além dessa diferença individual existente entre as folhas, pode-se perceber na Figura 4.10, à esquerda, que as folhas possuem uma variação no tamanho da mancha interna. Para reproduzir essa variação no exemplo sintetizado (à direita), foram modificados os dias de execução na geração do padrão, os quais, nesse caso, variaram entre 20, 23, 25, 27, 30 e 32.

Na Figura 4.12 podemos observar melhor essa variação. Nas miniaturas à esquerda, de cima para baixo, temos exemplos de folhas com manchas menores à maiores. Do mesmo modo, temos exemplificada essa variação nas folhas sintetizadas via MClone, onde, de cima para baixo, variamos o tempo de execução entre 23, 27 e 30 dias, respectivamente.

Apesar do cactus *Cereus Hildemannianus* ter sido classificado anteriormente como não estruturado, algumas de suas variações possuem uma estrutura regular no seu padrão, fazendo com que estes se classifiquem como parcialmente estruturados. Na Figura 4.13, à esquerda, podemos observar uma imagem de uma planta real que se encaixa neste caso.

Para sintetizar este cactus, foi utilizada uma textura, exibida no canto inferior esquerdo da imagem à direita, de modo a controlar a criação das células  $F$  na região desejada. Como pode ser percebido na imagem à direita, onde temos um exemplo deste cacto sintetizado pelo MClone.

O cogumelo *Amanita muscaria*, exibido na Figura 4.14 à esquerda, apesar de não pertencer ao Reino Vegetal, é outro exemplo de padrão parcialmente estruturado, o qual, segundo os princípios do MClone, é possível chegar em resultados satisfatórios. A partir de diversos testes, foi possível chegar a alguns padrões próximos do mesmo.



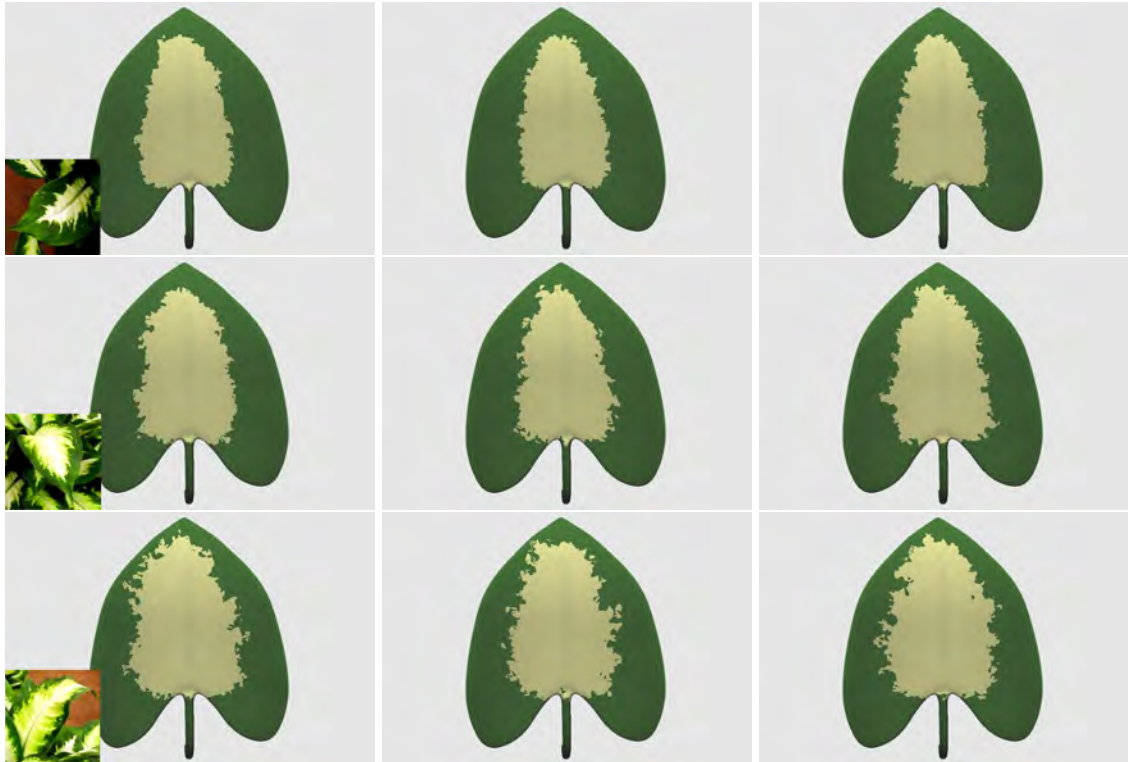


Figura 4.12: Exemplos de folhas da planta *Philodendron Oxycardium*, variando o tempo de execução entre 23 (superior), 27 (meio) e 30 (inferior) dias.

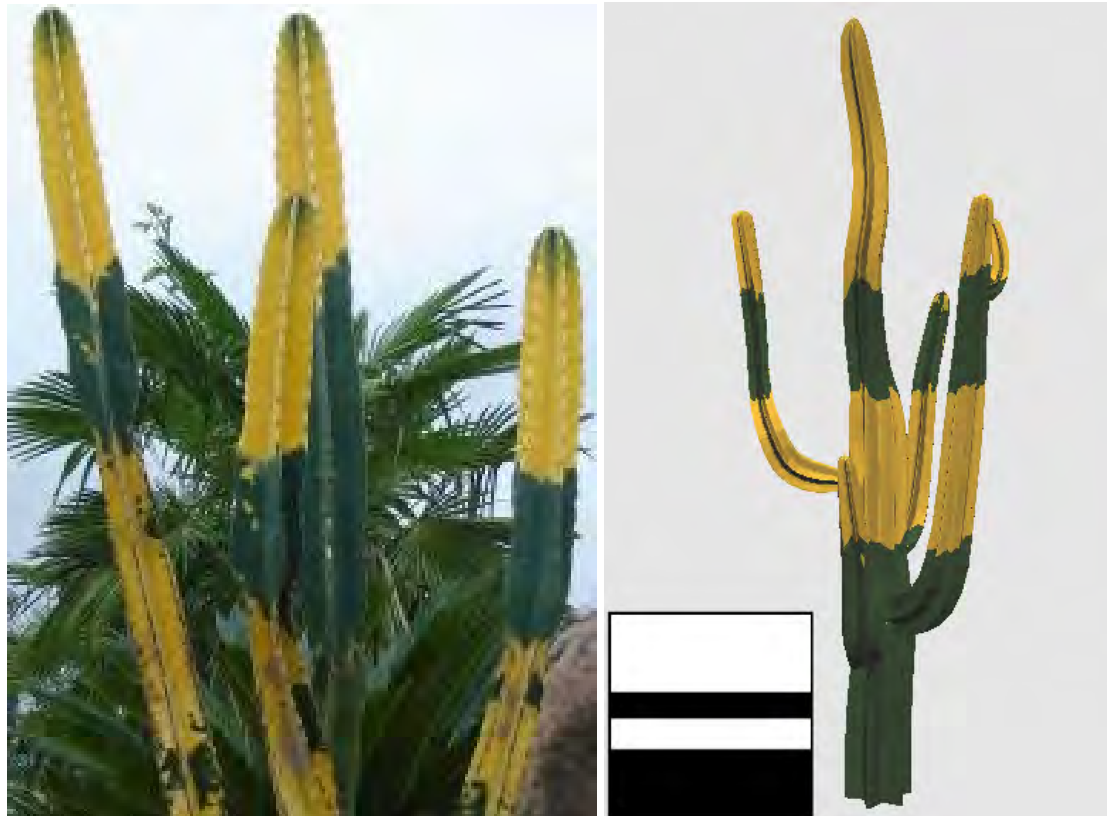


Figura 4.13: Cactus *Cereus Hildemannianus* com padrão parcialmente estruturado.

Na Figura 4.14 à direita e na Figura 4.15 pode-se observar quatro variações desses resultados. Nos quais usou-se uma imagem de textura, ilustrada ao lado do cogumelo sintetizado da Figura 4.14, ligada ao cilindro de controle para limitar o surgimento inicial de células vermelhas (tipo  $F$ ) à parte superior do objeto.



Figura 4.14: Exemplo de cogumelo real (esquerda) e cogumelo gerado pelo MClone (direita).



Figura 4.15: Exemplos de cogumelos sintetizados pelo MClone, variando a taxa de divisão de células  $F$  entre 6, 8 e 20, respectivamente.

### 4.1.3 Padrões Estruturados

Um conjunto interessante de exemplos de padrões estruturados são as listras de melancias, cientificamente conhecida como *Citrullus Lanatus*, pois, além da grande variação na sua aparência, há vários outros frutos que seguem este mesmo princípio.

O modelo procedural MClone pode facilmente manipular, por exemplo, faixas de várias larguras, como exemplificado na Figura 4.16. Para obter esta variação de resultados, utilizou-se um aumento no peso do raio de repulsão ( $w_r$ ), variando entre 1.0, 2.0 e 3.0, respectivamente. Uma vez que se permite um maior raio, há mais células na região de cálculo durante os passos de relaxamento, gerando listras mais largas.

Para todos os resultados de melancias, usamos uma imagem de textura com listras ligada ao cilindro de controle, ilustrada sobre a imagem da melancia mais à esquerda na Figura 4.16, definindo a posição espacial das listras iniciais na superfície da melancia.

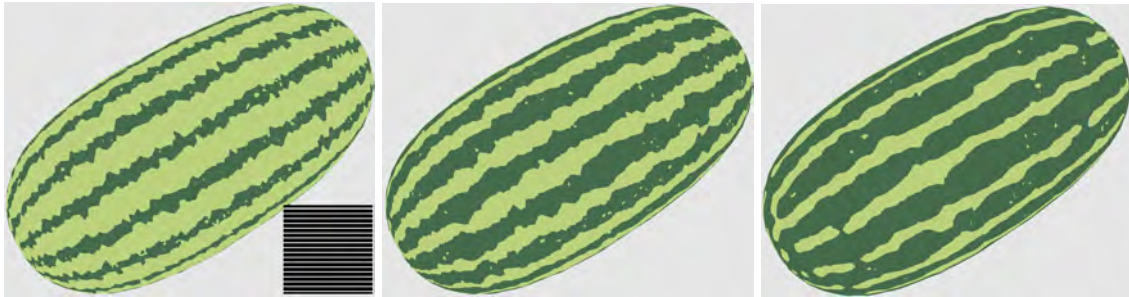


Figura 4.16: Exemplos de melancias (*Citrullus Lanatus*) com aumento da largura das listras por meio de variação no  $w_r$ .

Na Figura 4.17, ilustramos um dos tipos mais comuns de melancias esféricas. Enquanto na Figura 4.18, demonstramos uma espécie exótica conhecida como melancia quadrada (*square watermelon*), produzida principalmente no Japão, onde os frutos se desenvolvem dentro de uma caixa de vidro. A partir desses resultados, podemos observar que é possível gerar resultados similares e satisfatórios sobre superfícies distintas, isto é, os geração dos padrões via MClone não ficam limitados à geometria do objeto.



Figura 4.17: Exemplo de melancia esférica real (esquerda) e sintetizada (direita).



Figura 4.18: Exemplo de melancia quadrada real (esquerda) e sintetizada (direita).

Um outro exemplo de padrão estruturado é o *Sansevieria Trifasciata*, conhecido popularmente como Espada de São Jorge, que pode ser observado na Figura 4.19, à esquerda. Apesar de sua estrutura ser similar ao Filodendro, ele possui bordas mais regulares. Na mesma figura, à direita, temos um exemplo de algumas folhas sintetizadas pelo MClone. Devido a regularidade do padrão, todas as folhas utilizam os mesmos parâmetros de entrada, mas nem por isso possuem os mesmos resultados, e sim resultados similares, cada um com sua particularidade. Para obter estes resultados, também utilizou-se uma textura para o controle inicial das células  $F$ .



Figura 4.19: Popular Espada de São Jorge real (esquerda) e sintetizada pelo MClone (direita).

## 4.2 Refatoração do Código Fonte

Devido a implementação do modelo MClone ser relativamente antiga, no qual muitos pesquisadores já trabalharam, ela encontrava-se com sérios problemas de organização na estruturação do código fonte, além de algumas instabilidades em tempo de execução.

Como o mesmo estava desenvolvido na linguagem C, havia uma maior dificuldade de detecção de possíveis problemas em tempo de compilação. Por esse motivo, juntamente com uma maior facilidade para a organização do código, optou-se por passar o código fonte original para a linguagem C++. Essa alteração nos permitiu detectar diversas inconsistências, em tempo de compilação, que foram surgindo ao longo da evolução do sistema, bem como resultados mais estáveis e sem interrupções inesperadas em tempo de execução. Apesar da alteração da linguagem para C++, não foi utilizada orientação à objetos, porém a nova estrutura permite facilmente a introdução de novas extensões utilizando esse paradigma de programação.

Conforme já comentado, outro objetivo dessa alteração no código fonte, foi facilitar uma reorganização do código, de modo a auxiliar futuras extensões do modelo. Nesse processo, ocorreram diversas renomeações de arquivos, juntamente com divisões de arquivos que continham métodos com funcionalidades distintas, que não tinham um vínculo

comum com a nomenclatura do arquivo.

Outro passo importante dessa organização, foi a divisão do código fonte em pacotes, agrupando desse modo arquivos que possuam uma relação de funcionalidade no sistema. Para isso, foram criados basicamente seis pacotes: *control*, *data*, *distance*, *simulation*, *viewer* e *util*.

No pacote *control* foram concentrados códigos que possuem funcionalidades que estendem o funcionamento original do MClone, os quais têm como objetivo auxiliar, de alguma forma, o controle da geração do padrão, isso em qualquer passo do processamento. Como exemplo, podemos citar os arquivos referentes a implementação das Primitivas, Textura e Campo Vetorial, descritos na Seção 3.2.

Em *data*, armazenamos os arquivos fontes que comportam os dados utilizados durante o processamento do MClone, os quais não devem conter lógica computacional. Dentre as informações presentes nesse pacote, temos desde a estrutura da célula utilizada no processo da geração do padrão, até o arquivo fonte que comporta a estrutura do objeto no qual deseja-se gerar o padrão.

No pacote *distance*, estão os fontes responsáveis pelo processamento dos cálculos de distância das células na superfície da geometria do objeto, tanto entre as células, como referente aos deslocamentos das mesmas.

O pacote *simulation* é responsável por concentrar os processos de simulação da geração do padrão em si. Este, além de concentrar as funcionalidades básicas da simulação, como por exemplo, os processos de relaxamento e divisão celular, utiliza as funcionalidades desenvolvidas nos pacotes *control* e *distance*.

Já *viewer* é responsável pelo código fonte da parte gráfica do MClone, isto é, o visualizador dos resultados obtidos no processo de simulação. É por meio deste visualizador que podemos, além de ver os resultados da simulação, estruturar e visualizar algumas das informações de entrada do simulador, como por exemplo, informações referentes às primitivas ou ao campo vetorial.

No pacote *util* são concentrados processamentos que não são específicos do MClone, porém são utilizados para o funcionamento do mesmo, como, por exemplo, ferramentas de transformações matriciais ou geração de valores randômicos.

Com essa nova estrutura do código, acreditamos numa maior facilidade para a compreensão do funcionamento, a nível de código, do MClone, o que poderá auxiliar futuros trabalhos a explorar e estendê-lo com maior facilidade.

O código fonte do modelo MClone, juntamente com suas documentações, está disponível no Google Code, o qual pode ser acessado livremente através do link: <http://code.google.com/p/mclone/>.

### 4.3 Discussão

Como podemos perceber, a partir do modelo procedural MClone, juntamente com as extensões já desenvolvidas, podemos obter uma grande variedade de resultados no Reino Vegetal, sendo possível abordar uma ampla gama de padrões, desde padrões não estruturados a padrões estruturados.

Até mesmo nos resultados não estruturados, que aparentemente são mais simples de serem reproduzidos, percebeu-se que há vantagens na utilização do modelo MClone, comparado com outras técnicas.

Todos os exemplos de padrões sintetizados são padrões que se repetem em muitos outros casos da natureza além dos exibidos aqui. Abordou-se uma ampla variedade de

padrões do Reino Vegetal, os quais variam, não apenas dos não estruturados aos estruturados, mas também nas suas formas e tamanhos. Variando entre inúmeras manchas pequenas, como o Cogumelo, manchas de tamanhos variados, como a Folha-imperial e o Cacto Verde-e-Amarelo, manchas únicas e dominantes, como o Filodendro e a Espada de São Jorge, e até mesmo listras, como a melancia.

De modo a complementar os resultados apresentados neste trabalho, foi elaborado um vídeo que exemplifica grande parte do proposto aqui. Neste vídeo são apresentados exemplos dinâmicos, inclusive do envelhecimento de uma planta *Codiaeum Variegatum*. O vídeo pode ser acessado livremente através do link: <http://youtu.be/pidWPLFH0qY>.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentamos um levantamento bibliográfico de trabalhos de Computação Gráfica que têm como objetivo a modelagem ou síntese de características visuais presentes no Reino Vegetal. A partir deste levantamento detectou-se que há poucos estudos que abordam detalhes específicos da vegetação, como por exemplo, detalhes existentes nos padrões visuais de folhas, frutos e flores. Com isso, estabeleceu-se como objetivo o estudo de uma técnica que nos possibilitasse a reprodução desses padrões.

Com base nos resultados satisfatórios de padrões do Reino Animal gerados a partir do modelo procedural MClone (WALTER; FOURNIER; MENEVAUX, 2001), juntamente com um trabalho apresentado por Korn, no qual ele defende este modelo como uma possível técnica para reproduzir os padrões estriados existentes, por exemplo, em melancias (KORN, 2007), adotou-se como foco do trabalho o estudo da aplicabilidade e flexibilidade do modelo MClone na geração dos padrões existentes no Reino Vegetal.

Devido este modelo ser relativamente antigo e já ter sido estudado e expandido por diversos pesquisadores, percebeu-se a necessidade de uma avaliação e reorganização estrutural do código. Desse modo, alterou-se a linguagem do sistema de C para C++ e fez-se uma reestruturação do código fonte. Com isso, além da melhoria na manutenção do sistema, pode-se detectar problemas existentes na codificação do modelo, e assim resolver algumas instabilidades que dificultavam a utilização do mesmo.

Avaliando os resultados apresentados neste trabalho, podemos perceber que o modelo MClone tem uma grande capacidade de reproduzir os padrões existentes no Reino Vegetal. Conseguiu-se abordar vegetações e frutos que atacassem todas as categorias de padrões propostos, a saber, estruturados, parcialmente estruturados e não estruturados. Estes resultados puderam ser considerados satisfatórios, sendo a principal contribuição deste trabalho, pois conseguiram reproduzir muitas estruturas similares a padrões encontrados na natureza.

Mesmo com resultados satisfatórios para os padrões propostos, esbarrou-se em algumas dificuldades, como, por exemplo, a complexidade de definição dos parâmetros iniciais para a simulação. Porém, apesar dessa dificuldade inicial, após atingirmos um conjunto de valores que geram um padrão próximo do desejado, o modelo nos permite facilmente gerar variações nesses padrões de modo a refletir alguns fenômenos existentes na natureza.

Podemos usar como exemplo de fenômenos que podem ser facilmente reproduzidos pelo MClone, o fato de que não há duas plantas ou dois frutos com exatamente o mesmo padrão, exatamente como ocorre a cada execução deste modelo. Além desse fator fundamental, também podemos reproduzir diferenças existentes entre padrões de uma mesma espécie ou família e, até mesmo, simular o envelhecimento de um determinado padrão, como manchas aumentando ao longo do tempo. Esses fatores podem ser muito valiosos

para simulações de imagens cinematográficas ou realistas da natureza.

Durante a avaliação do modelo identificamos algumas limitações. Uma delas é a complexidade de gerar padrões com detalhes minuciosos. Para se atingir níveis de detalhes muito refinados, exige-se a utilização de um número muito elevado de células, o que acarreta em um tempo de execução extremamente elevado, podendo levar de muitos minutos, à horas ou até mesmo dias o tempo de execução.

Outra limitação é a grande dificuldade para geração de padrões com uma estrutura muito fixa ou regular, como, por exemplo, padrões que possuem uma estrutura de veias bem definida, o que ocorre com grande frequência em padrões de folhas, como podemos observar na Figura 5.1. Essa complexidade ocorre, além da possível necessidade de um maior refinamento, devido à dificuldade de controlar a criação inicial de células em pontos muito detalhados com as ferramentas existentes no MClone atualmente. A utilização da textura de controle nos auxilia em muitos casos, porém quando se trata de definir pontos muito específicos ou muito minuciosos para a criação de células iniciais, esta pode não ser uma técnica muito apropriada, pois nos deparamos com as mesmas dificuldades existentes em mapeamento de textura.



Figura 5.1: Exemplos de padrões visuais diretamente associados à estrutura venosa da folha.

Avaliando tanto os resultados atingidos, quanto as limitações e dificuldades encontradas, podemos concluir que o modelo MClone possui um grande potencial para reproduzir uma significativa parcela dos padrões existentes no Reino Vegetal. Atualmente já é possível abordar uma gama relativamente satisfatória desses padrões. Mesmo para os padrões que ainda não há a possibilidade de serem reproduzidos, ou que ainda há uma complexidade muito elevada envolvida, o MClone possui atualmente uma estrutura que nos permite estendê-lo de modo a permitir a geração da grande maioria desses padrões.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Anteriormente citamos duas grandes limitações existentes no modelo atual, as quais dificultam ou impedem a geração de alguns padrões existentes na natureza, porém nenhuma dessas limitações é considerada um problema sem solução. A seguir apresentaremos algumas soluções para essas limitações.

Como comentado na Seção 4.1, os tempos de execução do modelo para a geração dos padrões, por mais simples que sejam, podem ser considerados relativamente altos, variando geralmente de segundos a minutos, o que não nos permite utilizá-los em tempo real. Uma implementação desse modelo utilizando computação paralela pode diminuir significativamente o tempo de execução. Outra possível solução é a utilização de técnicas



multigrafe ou processamentos utilizando GPU, como Cuda, o que permitiria a execução da maioria das simulações em tempo real. Essas melhorias nos permitiriam aumentar a quantidade de células na simulação sem que haja um impacto tão grande no tempo de execução, o que nos permitiria gerar padrões mais minuciosos. Além disso, passaria a ser possível a criação de uma interface gráfica que auxiliasse, em tempo real, a configuração dos parâmetros iniciais, facilitando a utilização da ferramenta.

Como podemos observar na Figura 5.1, muitos dos padrões existentes em folhas e até mesmo em algumas flores, tem uma grande interferência das veias de alimentação. Um meio de auxiliar a geração desses padrões é a inclusão de técnicas que consigam simular essas veias na superfície do objeto, de modo a, por exemplo, limitar a criação de células iniciais nessas regiões. Em um trabalho de Runions, foi apresentada uma técnica de simulação das veias de folhas (RUNIONS et al., 2005), o qual seria um forte candidato a fornecer a estrutura venosa para integração no MClone. Isso nos permitiria reproduzir os padrões partindo de uma estrutura pré formada de veias, conseguindo atingir a grande maioria dos padrões existentes em folhas e flores.

## REFERÊNCIAS

BINSFELD, R.; GAMBOA, J.; WALTER, M. Visual Patterns in the Plant Kingdom. In: XXIV CONFERENCE ON GRAPHICS, PATTERNS AND IMAGES (SIBGRAPI 2011). **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p.86–92.

DEUSSEN, O. et al. Realistic Modeling and Rendering of Plant Ecosystems. In: SIGGRAPH 98. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1998. p.275–286. (Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series).

DIENER, J. et al. Wind projection basis for real-time animation of trees. **Computer Graphics Forum**, [S.l.], v.28, n.2, p.533–540, Apr. 2009.

FERWERDA, J. A. Three Varieties of Realism in Computer Graphics. In: IN PROCEEDINGS SPIE HUMAN VISION AND ELECTRONIC IMAGING '03. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2003. p.290–297.

FOWLER, D. R.; MEINHARDT, H.; PRUSINKIEWICZ, P. Modeling seashells. **SIGGRAPH Comput. Graph.**, New York, NY, USA, v.26, p.379–387, July 1992.

FUHRER, M.; JENSEN, H. W.; PRUSINKIEWICZ, P. Modeling hairy plants. In: PACIFIC CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND APPLICATIONS, 12. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004. p.217–226.

GROTEWOLD, E. The genetics and biochemistry of floral pigments. **Annual Review of Plant Biology**, [S.l.], p.761–780, 2006.

GUSMINI, G.; WEHNER, T. C. Genes determining rind pattern inheritance in watermelon: a review. **American Society for Horticultural Science**, [S.l.], v.40, p.1928–1930, 2005.

HABEL, R.; KUSTERNIG, A.; WIMMER, M. Physically Based Real-Time Translucency for Leaves. In: RENDERING TECHNIQUES 2007 (PROCEEDINGS EUROGRAPHICS SYMPOSIUM ON RENDERING). **Anais...** Eurographics Association, 2007. p.253–263.

HONG, S. M.; SIMPSON, B.; BARANOSKI, G. V. G. Interactive venation-based leaf shape modeling. **Computer Animation and Virtual Worlds**, [S.l.], v.16, n.3-4, p.415–427, 2005.

HOPKINS, W. G. **Introduction to Plant Physiology**. [S.l.]: Willey, 2003.

IJIRI, T. et al. Floral diagrams and inflorescences: interactive flower modeling using botanical structural constraints. **ACM Transactions on Graphics**, [S.l.], v.24, n.3, p.720–726, Aug. 2005.

IJIRI, T. et al. Surface-Based Growth Simulation for Opening Flowers. In: GRAPHICS INTERFACE 2008. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2008. p.227–234.

KANG, S. B. Image-based and sketch-based modeling of plants and trees. In: ASIAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION - VOLUME PART I, 10., Berlin, Heidelberg. **Proceedings...** Springer-Verlag, 2011. p.350–354. (ACCV'10).

KORN, R. W. Watermelon stripes. A case for the clonal mosaic model in plants. **Journal of theoretical biology**, [S.l.], v.247, p.859–861, 2007.

LIVNY, Y. et al. Texture-Lobes for Tree Modelling. **ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2011)**, [S.l.], 2011.

MOREIRA, C. E. S.; WALTER, M. A Flexible Model for Simulation of Mammalian Coats. In: COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING, 2002. PROCEEDINGS. XV BRAZILIAN SYMPOSIUM ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2002. p.426–.

MURRAY, J. D. **Mathematical Biology II: spatial models and biomedical applications**. [S.l.]: Springer New York, 2003. (Interdisciplinary Applied Mathematics, v.18).

OWADA, S. et al. Volumetric illustration: designing 3d models with internal textures. **ACM Transactions on Graphics**, [S.l.], v.23, n.3, p.322–328, Aug. 2004.

OWADA, S. et al. Volume Painter: geometry-guided volume modeling by sketching on the cross-section. In: EUROGRAPHICS WORKSHOP ON SKETCH-BASED INTERFACES AND MODELING. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2008. p.1–8.

PEYTAVIE, A. et al. Arches: a framework for modeling complex terrains. **Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics)**, [S.l.], v.28, n.2, p.457–467, 2009.

PIETRONI, N. et al. Texturing Internal Surfaces from a Few Cross Sections. **Computer Graphics Forum**, [S.l.], v.26, n.3, p.637–644, Sept. 2007.

PRUSINKIEWICZ, P. et al. The Use of Positional Information in the Modeling of Plants. In: ACM SIGGRAPH 2001. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2001. p.289–300. (Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series).

PRUSINKIEWICZ, P.; LINDENMAYER, A. **The algorithmic beauty of plants**. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 1996.

QUEIROZ, F.; WALTER, M. Synthesis of Black and White Textures using the Clonal Mosaic Model. In: WORKSHOPS OF SIBGRAPI 2009 - POSTERS, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** SBC, 2009.

QUEIROZ, F.; WALTER, M. Texture Synthesis of Contrasting Natural Patterns. In: GRAPHICS, PATTERNS AND IMAGES (SIBGRAPI), 2012 25TH SIBGRAPI CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2012. p.283 –290.

RODKAEW, Y.; CHONGSTITVATANA, P.; SIRIPANT, S. Modeling Plant Leaves in Marble-Patterned Colours with Particle Transportation System. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON FUNCTIONAL-STRUCTURAL PLANT MODELS, 4. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004. p.391–397.

RODKAEW, Y. et al. An algorithm for generating vein images for realistic modeling of a leaf. In: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL MATHEMATICS AND MODELING [CMM2002], Bangkok, Thailand. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2002.

RUNIONS, A. et al. Modeling and visualization of leaf venation patterns. **ACM Transactions on Graphics**, [S.l.], v.24, n.3, p.702–711, Aug. 2005.

SOLER, C. et al. An efficient instantiation algorithm for simulating radiant energy transfer in plant models. **ACM Transactions on Graphics**, [S.l.], v.22, n.2, p.204–233, Apr. 2003.

SUTHERLAND, I. E. Sketchpad: a man-machine graphical communication system. In: SPRING JOINT COMPUTER CONFERENCE, 1963. **Proceedings...** Spartan Books, 1963. v.23, p.329–346.

TAKAYAMA, K. et al. Lapped Solid Textures: filling a model with anisotropic textures. **ACM Transactions on Graphics**, [S.l.], v.27, n.3, p.53:1–53:9, Aug. 2008.

TAKAYAMA, K. et al. Volumetric Modeling with Diffusion Surfaces. **ACM Trans. Graph.**, New York, NY, USA, v.29, n.5, p.to appear, 2010.

TAN, P. et al. Image-based tree modeling. **ACM Trans. Graph.**, New York, NY, USA, v.26, p.87–1–87–7, July 2007.

VIENNOT, X. et al. Combinatorial analysis of ramified patterns and computer imagery of trees. **SIGGRAPH Comput. Graph.**, New York, NY, USA, v.23, p.31–40, July 1989.

VOGEL, H. A better way to construct the sunflower head. **Mathematical Biosciences**, [S.l.], v.44, n.3-4, p.179 – 189, 1979.

WALTER, M.; FOURNIER, A. Growing and Animating Polygonal Models of Animals. **Computer Graphics Forum**, [S.l.], v.16, p.pages, 1997.

WALTER, M.; FOURNIER, A.; MENEVAUX, D. Integrating shape and pattern in mammalian models. In: COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 28., New York, NY, USA. **Proceedings...** ACM, 2001. p.317–326. (SIGGRAPH '01).

WALTER, M.; FOURNIER, A.; REIMERS, M. **Clonal Mosaic Model for the Synthesis of Mammalian Coat Patterns**. 1998.

WANG, L. et al. Real-time rendering of plant leaves. **ACM Transactions on Graphics**, [S.l.], v.24, n.3, p.712–719, Aug. 2005.

WEIDLICH, A.; WILKIE, A. Modeling Aventurescent Gems with Procedural Textures. In: SPRING CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS (SCCG). **Proceedings...** ACM, 2008.

YESSIOS, C. I. Computer drafting of stones, wood, plant and ground materials. In: COMPUTER GRAPHICS (PROCEEDINGS OF SIGGRAPH 79). **Anais...** [S.l.: s.n.], 1979. p.190–198.

ZHOU, N. et al. Modeling and Visualization of Flower Color Patterns. In: TENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AIDED DESIGN AND COMPUTER GRAPHIC. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2007. p.150–155.

## APÊNDICE A

### Trabalhos de Computação Gráfica aplicados ao Reino Vegetal classificados por ano

Year	Paper
1979	[1] [2]
1984	[3] [4]
1985	[5] [6]
1986	[7]
1988	[8] [9]
1989	[10]
1990	[11]
1992	[12] [13]
1993	[14] [15] [16]
1994	[17] [18] [19] [20] [21]
1995	[22] [23] [24] [25]
1996	[26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33]
1997	[34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43]
1998	[44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51]
1999	[52] [53] [54] [55]
2000	[56] [56] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63]
2001	[64] [65] [66] [67] [68]
2002	[69] [70] [71]
2003	[72] [73] [74] [75] [76] [77] [78] [79] [80] [81] [82] [83] [84] [85]
2004	[86] [87] [88] [89] [90] [91] [92] [93] [94] [95] [96] [97] [98] [99] [100]
2005	[101] [102] [103] [104] [105] [106] [107] [108] [109] [110] [111] [112] [113] [114] [115] [116]
2006	[117] [118] [119] [120] [121] [122] [123] [124] [125]
2007	[126] [127] [128] [129] [130] [131] [132] [133] [134] [135] [136]
2008	[137] [138] [139] [140] [141] [142] [143] [144] [145] [146] [147]
2009	[148] [149] [150] [151] [152] [153] [154] [155] [156] [157] [158] [159] [160] [161] [162] [163] [164] [165] [166] [167] [168] [169] [170] [171] [172] [173] [174] [175] [176] [177] [178] [179] [180] [181] [182]
2010	[183] [184] [185] [186] [187] [188] [189] [190] [191] [192] [193] [194] [195] [196] [197] [198] [199] [200] [201] [202] [203]
2011	[204] [205] [206] [207] [208] [209] [210] [211] [212]

Tabela 1: Trabalhos de Computação Gráfica aplicados ao Reino Vegetal classificados por ano.

## APÊNDICE B

### Relação dos trabalhos de Computação Gráfica aplicados ao Reino Vegetal

RV - CG	Animation	Modeling	Pattern	Rendering
Bark		[84] [206]	[2]	[70]
Flower	[59] [139] [147] [188]	[107] [121] [200]	[1] [136]	
Fruit	[188]	[92] [132] [141] [144] [186]	[212]	
Leaf	[95] [151]	[12] [62] [71] [79] [80] [85] [98] [106] [110] [142] [179] [180] [166] [190] [205] [161]	[71] [98] [110] [212]	[26] [27] [34] [64] [73] [74] [113] [128] [142] [179]
Tree	[53] [56] [91] [115] [117] [143] [146] [149] [150] [20] [21]	[3] [5] [10] [15] [33] [47] [51] [53] [55] [68] [88] [89] [108] [109] [116] [124] [125] [131] [133] [134] [135] [145] [138] [153] [152] [154] [184] [185] [156] [157] [182] [165] [167] [159] [160] [162] [202] [203] [194] [191] [187] [207] [208] [209] [206] [168]	[10] [125]	[23] [24] [25] [29] [63] [66] [81] [93] [94] [97] [105] [115] [127] [137] [183]

Tabela 2: Trabalhos de Computação Gráfica aplicados ao Reino Vegetal - Parte 1.

<b>RV - CG</b>	<b>Animation</b>	<b>Modeling</b>	<b>Pattern</b>	<b>Rendering</b>
Plant	[7] [16] [28] [43] [65] [86] [96] [99] [103] [120] [129] [140]	[4] [8] [9] [11] [13] [14] [16] [17] [18] [19] [22] [28] [30] [31] [32] [35] [36] [38] [39] [42] [45] [46] [48] [49] [50] [52] [54] [57] [58] [60] [61] [67] [69] [72] [75] [76] [77] [82] [85] [90] [101] [102] [111] [114] [118] [119] [122] [123] [126] [148] [193] [169] [170] [210] [171] [202] [172] [197] [211] [198] [199] [173] [195] [196] [174] [175] [176] [194] [177] [178] [192] [164] [158] [204]		[6] [37] [40] [41] [44] [45] [78] [83] [104] [112] [130]
Other		[100] [87] [155] [181] [201]		

Tabela 3: Trabalhos de Computação Gráfica aplicados ao Reino Vegetal - Parte 2.



## BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

- [1] H. Vogel, "A better way to construct the sunflower head," *Mathematical Biosciences*, vol. 44, no. 3-4, pp. 179 – 189, 1979.
- [2] C. I. Yessios, "Computer drafting of stones, wood, plant and ground materials," in *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 79)*, Aug. 1979, pp. 190–198.
- [3] M. Aono and T. Kunii, "Botanical tree image generation," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 4, pp. 10–34, May 1984.
- [4] A. R. Smith, "Plants, fractals, and formal languages," *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 18, pp. 1–10, January 1984.
- [5] J. Bloomenthal, "Modeling the mighty maple," in *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 85)*, Jul. 1985, pp. 305–311.
- [6] W. T. Reeves and R. Blau, "Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems," in *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 85)*, Jul. 1985, pp. 313–322.
- [7] P. E. Oppenheimer, "Real time design and animation of fractal plants and trees," in *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 86)*, Aug. 1986, pp. 55–64.
- [8] P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, and J. Hanan, "Developmental models of herbaceous plants for computer imagery purposes," in *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 88)*, Aug. 1988, pp. 141–150.
- [9] P. de Reffye, C. Edelin, J. Francon, M. Jaeger, and C. Puech, "Plant models faithful to botanical structure and development," in *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 88)*, Aug. 1988, pp. 151–158.
- [10] X. Viennot, G. Eyrolles, N. Janey, and D. Arquès, "Combinatorial analysis of ramified patterns and computer imagery of trees," *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 23, pp. 31–40, July 1989.
- [11] P. Prusinkiewicz and J. Hanan, *Visualization of botanical structures and processes using parametric L-systems*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1990, pp. 183–201.
- [12] M. S. Hammel, P. Prusinkiewicz, and B. Wyvill, "Modelling compound leaves using implicit contours," in *Proceedings of the 1992 Western Computer Graphics Symposium*, Apr. 1992, pp. 27–34.
- [13] J. S. Hanan, "Parametric l-systems and their application to the modelling and visualization of plants," Ph.D. dissertation, University of Regina, 1992, aAINN83871.

- [14] P. Prusinkiewicz, "Visual models of morphogenesis," *Artif. Life*, vol. 1, pp. 61–74, January 1993.
- [15] ———, "Modeling and visualization of biological structures," in *In Proceeding of Graphics Interface*, 1993, pp. 128–137.
- [16] P. Prusinkiewicz, M. S. Hammel, and E. Mjolsness, "Animation of plant development," in *Proceedings of SIGGRAPH 93*, ser. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, Aug. 1993, pp. 351–360.
- [17] B. Benes, "Generating plants for computer graphics," in *Winter School of Computer Graphics 1994*, Jan. 1994.
- [18] P. Prusinkiewicz, M. James, and R. Mech, "Synthetic topiary," in *Proceedings of SIGGRAPH 94*, ser. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, Jul. 1994, pp. 351–358.
- [19] P. W. Prusinkiewicz, W. R. Remphrey, C. G. Davidson, and M. S. Hammel, "Modeling the architecture of expanding *fraxinus pennsylvanica* shoots using l-systems," *Canadian Journal of Botany*, vol. 72, no. 5, pp. 701–714, 1994.
- [20] N. Chiba, K. Ohshida, K. Muraoka, M. Miura, and N. Saito, "A growth model having the abilities of growth-regulations for simulating visual nature of botanical trees," *Computers & Graphics*, vol. 18, no. 4, pp. 469 – 479, 1994.
- [21] N. Chiba, S. Ohkawa, K. Muraoka, and M. Miura, "Visual simulation of botanical trees based on virtual heliotropism and dormancy break," *The Journal of Visualization and Computer Animation*, vol. 5, pp. 3–15, 1994.
- [22] B. Benes, "Generating plants using nurbs," in *Winter School of Computer Graphics 1995*, Feb. 1995.
- [23] M. Chover, R. Vivo, R. Quiros, and X. Lluch, "Texture, displacement and immersion: A model for tree rendering," in *Winter School of Computer Graphics 1995*, Feb. 1995.
- [24] N. Max and K. Ohsaki, "Rendering trees from precomputed z-buffer views," in *Eurographics Rendering Workshop 1995*, Jun. 1995, pp. 74–81.
- [25] J. Weber and J. Penn, "Creation and rendering of realistic trees," in *Proceedings of SIGGRAPH 95*, ser. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, Aug. 1995, pp. 119–128.
- [26] N. Chiba, K. Ohshida, K. Muraoka, and N. Saito, "Visual simulation of leaf arrangement and autumn colours," *The Journal of Visualization and Computer Animation*, vol. 7, no. 2, pp. 79–93, Apr./Jun. 1996.
- [27] Y. M. Govaerts, S. Jacquemoud, M. M. Verstraete, and S. L. Ustin, "Three-dimensional radiation transfer modeling in a dycotyledon leaf," *Applied Optics*, vol. 35, pp. 6585–6598, 1996.
- [28] B. Lintermann and O. Deussen, "Interactive modelling and animation of branching botanical structures," in *Proceedings of the Eurographics workshop on Computer animation and simulation '96*. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 1996, pp. 139–151.
- [29] N. Max, "Hierarchical rendering of trees from precomputed multi-layer z-buffers," in *Eurographics Rendering Workshop 1996*, Jun. 1996, pp. 165–174.

- [30] R. Mech and P. Prusinkiewicz, "Visual models of plants interacting with their environment," in *Proceedings of SIGGRAPH 96*, ser. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, Aug. 1996, pp. 397–410.
- [31] P. Prusinkiewicz, M. Hammel, J. Hanan, and R. Mech, "L-systems: From the theory to visual models of plants," in *Proceedings of the 2nd CSIRO Symposium on Computational Challenges in Life Sciences*, 1996.
- [32] C. Traxler and M. Gervautz, "Using genetic algorithms to improve the visual quality of fractal plants generated with csg-pl systems," in *Winter School of Computer Graphics 1996*, Feb. 1996.
- [33] J. C. Hart and B. Baker, "Implicit modeling of tree surfaces," in *In Proceedings of Implicit Surfaces '96*, 1996, pp. 143–152.
- [34] G. V. G. Baranoski and J. G. Rokne, "An algorithmic reflectance and transmittance model for plant tissue," *Computer Graphics Forum*, vol. 16, no. 3, pp. 141–150, Aug. 1997.
- [35] B. Benes, "Fast estimation of growth direction in virtual plants simulation," in *Fifth International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization (Winter School on Computer Graphics)*, Feb. 1997.
- [36] —, "Visual model of plant development with respect to influence of light," in *Computer Animation and Simulation '97*, Sep. 1997, pp. 125–136.
- [37] N. Chiba, K. Muraoka, A. Doi, and J. Hosokawa, "Rendering of forest scenery using 3d textures," *The Journal of Visualization and Computer Animation*, vol. 8, no. 4, pp. 191–199, 1997.
- [38] O. Deussen and B. Lintermann, "A modelling method and user interface for creating plants," in *Graphics Interface '97*, May 1997, pp. 189–198.
- [39] J. J. Loomis, X. Liu, Z. Ding, K. Fujimura, M. L. Evans, and H. Ishikawa, "Visualization of plant growth," in *IEEE Visualization '97*, Nov. 1997, pp. 475–478.
- [40] D. Marshall, D. Fussell, and A. T. C. III, "Multiresolution rendering of complex botanical scenes," in *Graphics Interface '97*, May 1997, pp. 97–104.
- [41] N. L. Max, C. Mobley, B. Keating, and E.-H. Wu, "Plane-parallel radiance transport for global illumination in vegetation," in *Eurographics Rendering Workshop 1997*, Jun. 1997, pp. 239–250.
- [42] H. Sinoquet and P. Rivet, "Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device," *Trees - Structure and Function*, vol. 11, pp. 265–270, 1997, 10.1007/s004680050084.
- [43] J. Stam, "Stochastic dynamics: Simulating the effects of turbulence on flexible structures," *Computer Graphics Forum*, vol. 16, no. 3, pp. 159–164, Aug. 1997.
- [44] M. Chelle, B. Andrieu, and K. Bouatouch, "Nested radiosity for plant canopies," *The Visual Computer*, vol. 14, no. 3, pp. 109–125, 1998.
- [45] O. Deussen, P. M. Hanrahan, B. Lintermann, R. Mech, M. Pharr, and P. Prusinkiewicz, "Realistic modeling and rendering of plant ecosystems," in *Proceedings of SIGGRAPH 98*, ser. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, Jul. 1998, pp. 275–286.
- [46] D. H. House, G. S. Schmidt, S. A. Arvin, and M. Kitagawa-DeLeon, "Visualizing a real forest," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 18, pp. 12–15, January 1998.

- [47] P. Kruszewski and S. Whitesides, “A general random combinatorial model of botanical trees,” *Journal of Theoretical Biology*, vol. 191, no. 2, pp. 221 – 236, 1998.
- [48] B. Lintermann and O. Deussen, “A modelling method and user interface for creating plants,” *Computer Graphics Forum*, vol. 17, no. 1, pp. 73–82, 1998.
- [49] P. Prusinkiewicz, “Modeling of spatial structure and development of plants: a review,” *Scientia Horticulturae*, vol. 74, no. 1-2, pp. 113 – 149, 1998.
- [50] P. Prusinkiewicz and P. Prusinkiewicz, “In search of the right abstraction: the synergy between art, science, and information technology in the modeling of natural phenomena,” in *In Art @ Science*, C. Sommerer and. Springer, 1998, pp. 60–68.
- [51] T. Sakaguchi, “Botanical tree structure modeling based on real image set,” in *ACM SIGGRAPH 98 Conference abstracts and applications*, ser. SIGGRAPH '98. New York, NY, USA: ACM, 1998, pp. 272–.
- [52] B. Lintermann and O. Deussen, “Interactive modeling of plants,” *IEEE Computer Graphics & Applications*, vol. 19, no. 1, pp. 56–65, Jan./Feb. 1999.
- [53] T. Sakaguchi and J. Ohya, “Modeling and animation of botanical trees for interactive virtual environments,” in *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, ser. VRST '99. New York, NY, USA: ACM, 1999, pp. 139–146.
- [54] J. L. Power, A. J. B. Brush, P. Prusinkiewicz, and D. H. Salesin, “Interactive arrangement of botanical l-system models,” in *Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics*, ser. I3D '99. New York, NY, USA: ACM, 1999, pp. 175–182.
- [55] G. Kûkai, Z. Tûth, and R. VÂ·nyi, “Evolving artificial trees described by parametric l-systems,” *IEEE Canadian Conf. on Electrical and Computer Enginerring*, vol. 3, pp. 1722–1727, 1999.
- [56] P. Balandier, A. Lacoïnte, X. L. Roux, H. Sinoquet, P. Cruiziat, and S. L. Dizès, “Simwal: A structural-functional model simulating single walnut tree growth in response to climate and pruning,” *Ann. For. Sci.*, vol. 57, no. 5, pp. 571–585, 2000.
- [57] H. Gautier, R. Mech, P. Prusinkiewicz, and C. Varlet-Grancher, “3d architectural modelling of aerial photomorphogenesis in white clover (*trifolium repens* l.) using l-systems,” *Annals of Botany*, vol. 85, no. 3, pp. 359–370, 2000.
- [58] C. Jirasek, P. Prusinkiewicz, and B. Moulia, “Integrating biomechanics into developmental plant models expressed using l-systems,” in *Plant biomechanics 2000. Proceedings of the 3rd Plant Biomechanics Conference*, August 2000, pp. 615–624.
- [59] Z. Lu, C. Willis, and D. Paddon, “Perceptually realistic flower generation,” in *Eighth International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Interactive Digital Media (Winter School on Computer Graphics)*, Feb. 2000, pp. x–y.
- [60] P. Prusinkiewicz, J. Hanan, and R. Mech, “An l-system-based plant modeling language,” in *Proceedings of the International Workshop on Applications of Graph Transformations with Industrial Relevance*, ser. AGTIVE '99. London, UK: Springer-Verlag, 2000, pp. 395–410.
- [61] P. Prusinkiewicz, R. Karwowski, R. Mech, and J. Hanan, “L-studio/cpfg: A software system for modeling plants,” in *Applications of Graph Transformations with Industrial Relevance*, ser. Lecture Notes in Computer Science, M. Nagl, A. Schûrr, and M. Mûnch, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, April 2000, vol. 1779, ch. 38, pp. 161–164.

- [62] Y. Rodkaew, S. Siripant, C. Lursinsap, and P. Chongstitvatana, "Generate leaf shapes using l-system and genetic algorithms," in *Proceedings of the First International Conference on Intelligent Technologies*, 2000, pp. 154–158.
- [63] O. Deussen and T. Strothotte, "Computer-generated pen-and-ink illustration of trees," in *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, ser. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, Jul. 2000, pp. 13–18.
- [64] G. V. G. Baranoski and J. G. Rokne, "Efficiently simulating scattering of light by leaves," *The Visual Computer*, vol. 17, no. 8, pp. 491–505, 2001.
- [65] T. Di Giacomo, S. Capo, and F. Faure, "An interactive forest," in *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation, EGCAS 2001, September, 2001*, ser. Computer Science, N. Magnenat-Thalmann and D. Thalmann, Eds. Manchester, Royaume-Uni: Springer, Sep. 2001, pp. 65–74.
- [66] A. Meyer, F. Neyret, and P. Poulin, "Interactive rendering of trees with shading and shadows," in *Rendering Techniques 2001: 12th Eurographics Workshop on Rendering*, Jun. 2001, pp. 183–196.
- [67] P. Prusinkiewicz, L. Mündermann, R. Karwowski, and B. Lane, "The use of positional information in the modeling of plants," in *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001*, ser. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, Aug. 2001, pp. 289–300.
- [68] I. Shlyakhter, M. Rozenoer, J. Dorsey, and S. Teller, "Reconstructing 3d tree models from instrumented photographs," *IEEE Computer Graphics & Applications*, vol. 21, no. 3, pp. 53–61, May/Jun. 2001.
- [69] B. Lane and P. Prusinkiewicz, "Generating spatial distributions for multilevel models of plant communities," in *Graphics Interface 2002*, May 2002, pp. 69–80.
- [70] S. Lefebvre and F. Neyret, "Synthesizing bark," in *Rendering Techniques 2002: 13th Eurographics Workshop on Rendering*, Jun. 2002, pp. 105–116.
- [71] Y. Rodkaew, S. Siripant, C. Lursinsap, and P. Chongstitvatana, "An algorithm for generating vein images for realistic modeling of a leaf," in *Proceedings of The International Conference on Computational Mathematics and Modeling [CMM2002]*, Bangkok, Thailand, May 2002.
- [72] F. Boudon, P. Prusinkiewicz, P. Federl, C. Godin, and R. Karwowski, "Interactive design of bonsai tree models," *Computer Graphics Forum*, vol. 22, no. 3, pp. 591–600, Sep. 2003.
- [73] O. Franzke and O. Deussen, "Accurate graphical representation of plant," in *In Plant Modelling and Applications (2003)*, de Reffye P. Ed.), Springer-Verlag, 2003.
- [74] ———, "Rendering plant leaves faithfully," in *ACM SIGGRAPH 2003 Sketches & Applications*, ser. SIGGRAPH '03. New York, NY, USA: ACM, 2003, pp. 1–1.
- [75] W. V. Haevre and P. Bekaert, "A simple but effective algorithm to model the competition of virtual plants for light and space," in *Journal of WSCG*, 2003, p. 2003.
- [76] J. Hanan, M. Renton, and E. Yorston, "Simulating and visualising spray deposition on plant canopies," in *GRAPHITE 2003*, 2003, pp. 259–260.
- [77] J. C. Hart, B. Baker, and J. Michaelraj, "Structural simulation of tree growth and response," *The Visual Computer*, vol. 19, no. 2, pp. 151–163, 2003.

- [78] J. Lluch, E. Camahort, and R. Vivó, "Procedural multiresolution for plant and tree rendering," in *AFRIGRAPH 2003*, Nov. 2003, pp. 31–38.
- [79] B. I. Loch, J. A. Belward, and J. S. Hanan, "Boundary treatment for virtual leaf surfaces," in *GRAPHITE 2003*, 2003, pp. 261–262.
- [80] L. Mundermann, P. MacMurchy, J. Pivovarov, and P. Prusinkiewicz, "Modeling lobed leaves," in *Computer Graphics International 2003*, Jul. 2003, pp. 60–65.
- [81] X. Qin, E. Nakamae, K. Tadamura, and Y. Nagai, "Fast photo-realistic rendering of trees in daylight," *Computer Graphics Forum*, vol. 22, no. 3, pp. 243–252, Sep. 2003.
- [82] M. Renton, J. Hanan, and P. Kaitaniemi, "The inside story: including physiology in structural plant models," in *GRAPHITE 2003*, 2003, pp. 95–102.
- [83] C. Soler, F. X. Sillion, F. Blaise, and P. Dereffye, "An efficient instantiation algorithm for simulating radiant energy transfer in plant models," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 22, no. 2, pp. 204–233, Apr. 2003.
- [84] X. Wang, L. Wang, L. Liu, S. Hu, and B. Guo, "Interactive modeling of tree bark," in *11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, Oct. 2003, pp. 83–90.
- [85] Y. Rodkaew, P. Chongstitvatana, S. Siripant, and C. Lursinsap, "Particle systems for plant modeling," in *Proceedings of Plant International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and their Applications*, 2003, pp. 210–217.
- [86] J. Beaudoin and J. Keyser, "Simulation levels of detail for plant motion," in *2004 ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation*, Jul. 2004, pp. 297–304.
- [87] M. Fuhrer, H. W. Jensen, and P. Prusinkiewicz, "Modeling hairy plants," in *12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, Oct. 2004, pp. 217–226.
- [88] C. Galbraith, P. MacMurchy, and B. Wyvill, "Blobtree trees," in *Computer Graphics International 2004*, Jun. 2004, pp. 78–85.
- [89] C. Galbraith, L. Mundermann, and B. Wyvill, "Implicit visualization and inverse modeling of growing trees," *Computer Graphics Forum*, vol. 23, no. 3, pp. 351–360, Sep. 2004.
- [90] W. V. Haevre, F. D. Fiore, P. Bekaert, and F. V. Reeth, "A ray density estimation approach to take into account environment illumination in plant growth simulation," in *Spring Conference on Computer Graphics 2004*, Apr. 2004, pp. 121–131.
- [91] S. Ota, M. Tamura, T. Fujimoto, K. Muraoka, and N. Chiba, "A hybrid method for real-time animation of trees swaying in wind fields," *The Visual Computer*, vol. 20, no. 10, pp. 613–623, 2004.
- [92] S. Owada, F. Nielsen, M. Okabe, and T. Igarashi, "Volumetric illustration: designing 3d models with internal textures," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 23, no. 3, pp. 322–328, Aug. 2004.
- [93] A. Reche-Martinez, I. Martin, and G. Drettakis, "Volumetric reconstruction and interactive rendering of trees from photographs," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 23, no. 3, pp. 720–727, Aug. 2004.
- [94] G. Szijarto and J. Koloszar, "Real-time hardware accelerated rendering of forests at human scale," in *Twelfth International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (Winter School on Computer Graphics)*, Feb. 2004, pp. 443–450.

- [95] I. R. Wang, J. W. L. Wan, and G. V. G. Baranoski, "Physically-based simulation of plant leaf growth: Research articles," *Comput. Animat. Virtual Worlds*, vol. 15, pp. 237–244, July 2004.
- [96] J. C. Wong and A. Datta, "Animating real-time realistic movements in small plants," in *GRAPHITE 2004*, Jun. 2004, pp. 182–189.
- [97] M. Braitmaier, J. Diepstraten, and T. Ertl, "Real-time rendering of seasonal influenced trees," *Theory and Practice of Computer Graphics*, vol. 0, pp. 152–159, 2004.
- [98] Y. Rodkaew, P. Chongstitvatana, and S. Siripant, "Modeling plant leaves in marble-patterned colours with particle transportation system," in *4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models*, 2004, pp. 391–397.
- [99] Y. Rodkaew, S. Chuai-Aree, S. Siripant, C. Lursinsap, and P. Chongstitvatana, "Animating plant growth in l-system by parametric functional symbols," *Int. J. Intell. Syst.*, vol. 19, pp. 9–23, January 2004.
- [100] B. Desbenoit, E. Galin, and S. Akkouche, "Simulating and modeling lichen growth," *Computer Graphics Forum*, vol. 23, pp. 341–350, 2004.
- [101] M. Alsweis and O. Deussen, "Modeling and visualization of symmetric and asymmetric plant competition," in *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, Aug. 2005, pp. 83–88.
- [102] A. Dietrich, C. Colditz, O. Deussen, and P. Slusallek, "Realistic and interactive visualization of high-density plant ecosystems," in *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, Aug. 2005, pp. 73–82.
- [103] L. C. Y. Endo, C. H. Morimoto, and A. E. Fabris, "Jecosys - a framework for interactive plants simulation," in *Computer Graphics International 2005*, Jun. 2005, pp. 66–73.
- [104] A. L. Fuhrmann, E. Umlauf, and S. Mantler, "Extreme model simplification for forest rendering," in *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, Aug. 2005, pp. 57–66.
- [105] G. Gilet, A. Meyer, and F. Neyret, "Point-based rendering of trees," in *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, Aug. 2005, pp. 67–72.
- [106] S. M. Hong, B. Simpson, and G. V. G. Baranoski, "Interactive venation-based leaf shape modeling," *Computer Animation and Virtual Worlds*, vol. 16, no. 3-4, pp. 415–427, 2005.
- [107] T. Ijiri, S. Owada, M. Okabe, and T. Igarashi, "Floral diagrams and inflorescences: interactive flower modeling using botanical structural constraints," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, pp. 720–726, Aug. 2005.
- [108] N. Murakami, K. Onishi, Y. Kitamura, and F. Kishino, "Modeling of trees with 3d gestures and growth simulation," in *IPT / EGVE 2005*, Oct. 2005, pp. 97–104.
- [109] M. Okabe, S. Owada, and T. Igarash, "Interactive design of botanical trees using freehand sketches and example-based editing," *Computer Graphics Forum*, vol. 24, no. 3, pp. 487–496, Sep. 2005.
- [110] A. Runions, M. Fuhrer, B. Lane, P. Federl, A.-G. Rolland-Lagan, and P. Prusinkiewicz, "Modeling and visualization of leaf venation patterns," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, pp. 702–711, Aug. 2005.
- [111] L. Streit, P. Federl, and M. Sousa, "Modelling plant variation through growth," *Computer Graphics Forum*, vol. 24, no. 3, pp. 497–506, Sep. 2005.

- [112] M. J. Vicent, V. Rosell, and R. Vivó, “A polar-plane-based method for natural illumination of plants and trees,” *Computers & Graphics*, vol. 29, no. 2, pp. 203–208, Apr. 2005.
- [113] L. Wang, W. Wang, J. Dorsey, X. Yang, B. Guo, and H.-Y. Shum, “Real-time rendering of plant leaves,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, pp. 712–719, Aug. 2005.
- [114] X. Wei, F. Qiu, W. Li, S. Yoakum-Stover, and A. Kaufman, “Visual simulation of chemical gardens,” in *Computer Graphics International 2005*, Jun. 2005, pp. 74–81.
- [115] D. Wesslèn and S. Seipel, “Real-time visualization of animated trees,” *The Visual Computer*, vol. 21, no. 6, pp. 307–405, 2005.
- [116] H. Xu, N. Gossett, and B. Chen, “Knowledge-based modeling of laser-scanned trees,” in *SIGGRAPH '05: ACM SIGGRAPH 2005 Sketches*. New York, NY, USA: ACM, 2005, p. 124.
- [117] Y. Akagi and K. Kitajima, “Computer animation of swaying trees based on physical simulation,” *Computers & Graphics*, vol. 30, no. 4, pp. 529–539, Aug. 2006.
- [118] M. Alswais and O. Deussen, “Wang-tiles for the simulation and visualization of plant competition,” in *Computer Graphics International 2006*, Jun. 2006, pp. 1–11.
- [119] F. Anastacio, M. C. Sousa, F. Samavati, and J. A. Jorge, “Modeling plant structures using concept sketches,” in *Proceedings of the 4th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*, ser. NPAR '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 105–113.
- [120] J. Diener, L. Reveret, and E. Fiume, “Hierarchical retargetting of 2d motion fields to the animation of 3d plant models,” in *2006 ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation*, Sep. 2006, pp. 187–194.
- [121] T. Ijiri, S. Owada, and T. Igarashi, “Seamless integration of initial sketching and subsequent detail editing in flower modeling,” *Computer Graphics Forum*, vol. 25, no. 3, pp. 617–624, Sep. 2006.
- [122] L. Quan, P. Tan, G. Zeng, L. Yuan, J. Wang, and S. B. Kang, “Image-based plant modeling,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 25, no. 3, pp. 599–604, Jul. 2006.
- [123] L. Streit, P. Lapides, M. C. Sousa, and E. Sharlin, “Modeling plant variations through 3d interactive sketches,” in *Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling*, Sep. 2006, pp. 99–106.
- [124] R. Wang, W. Hua, Z. Dong, Q. Peng, and H. Bao, “Synthesizing trees by plantons,” *The Visual Computer*, vol. 22, no. 4, pp. 238–248, 2006.
- [125] H. Zhang, M. Zhou, and X. Wang, “The research of trees simulation based on ifs and binary model system,” in *Plant Growth Modeling and Applications, 2006. PMA '06. Second International Symposium on*, nov. 2006, pp. 266–273.
- [126] T. Dornbusch, P. Wernecke, and W. Diepenbrock, “Description and visualization of graminaceous plants with an organ-based 3d architectural model, exemplified for spring barley (*hordeum vulgare* l.),” *The Visual Computer*, vol. 23, no. 8, pp. 569–581, Aug. 2007.
- [127] I. García, G. Patow, M. Sbert, and L. Szirmay-Kalos, “Multi-layered indirect texturing for tree rendering,” in *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, S. M. D. Ebert, Ed., 2007.



- [128] R. Habel, A. Kusternig, and M. Wimmer, “Physically based real-time translucency for leaves,” in *Rendering Techniques 2007 (Proceedings Eurographics Symposium on Rendering)*, J. Kautz and S. Pattanaik, Eds., Eurographics. Eurographics Association, Jun. 2007, pp. 253–263.
- [129] D. L. James, C. D. Twigg, A. Cove, and R. Y. Wang, “Mesh ensemble motion graphs: Data-driven mesh animation with constraints,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 4, pp. 17:1–17:16, Oct. 2007.
- [130] T. Luft, M. Balzer, and O. Deussen, “Expressive illumination of foliage based on implicit surfaces,” in *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*. Universität Konstanz, 2007.
- [131] B. Neubert, T. Franken, and O. Deussen, “Approximate image-based tree-modeling using particle flows,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, pp. 88:1–88:8, Jul. 2007.
- [132] N. Pietroni, M. A. Otaduy, B. Bickel, F. Ganovelli, and M. Gross, “Texturing internal surfaces from a few cross sections,” *Computer Graphics Forum*, vol. 26, no. 3, pp. 637–644, Sep. 2007.
- [133] A. Runions, B. Lane, and P. Prusinkiewicz, “Modeling trees with a space colonization algorithm,” in *Eurographics Workshop on Natural Phenomena, 2007*.
- [134] P. Tan, G. Zeng, J. Wang, S. B. Kang, and L. Quan, “Image-based tree modeling,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 26, pp. 87–1–87–7, July 2007.
- [135] H. Xu, N. Gossett, and B. Chen, “Knowledge and heuristic-based modeling of laser-scanned trees,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 4, pp. 19:1–19:13, Oct. 2007.
- [136] N. Zhou, W. Dong, J. Wang, and J.-C. Paul, “Modeling and visualization of flower color patterns,” in *Proceedings of the Tenth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphic, 2007*, pp. 150–155.
- [137] K. Boulanger, K. Bouatouch, and S. Pattanaik, “Rendering trees with indirect lighting in real time,” *Computer Graphics Forum*, vol. 27, no. 4, pp. 1189–1198, Jun. 2008.
- [138] X. Chen, B. Neubert, Y.-Q. Xu, O. Deussen, and S. B. Kang, “Sketch-based tree modeling using markov random field,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 5, pp. 109:1–109:9, Dec. 2008.
- [139] T. Ijiri, M. Yokoo, S. Kawabata, and T. Igarashi, “Surface-based growth simulation for opening flowers,” in *Graphics Interface 2008*, May 2008, pp. 227–234.
- [140] E. de Langre, “Effects of wind on plants,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 40, no. 1, pp. 141–168, 2008.
- [141] S. Owada, T. Harada, P. Holzer, and T. Igarashi, “Volume painter: Geometry-guided volume modeling by sketching on the cross-section,” in *EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling, 2008*, pp. 1–8.
- [142] A. Peyrat, O. Terraz, S. Merillou, and E. Galin, “Generating vast varieties of realistic leaves with parametric 2gmap l-systems,” *The Visual Computer*, vol. 24, no. 7-9, pp. 807–816, Jul. 2008.
- [143] M. Rodriguez, E. d. Langre, and B. Moulia, “A scaling law for the effects of architecture and allometry on tree vibration modes suggests a biological tuning to modal compartmentalization,” *Am. J. Bot.*, vol. 95, no. 12, pp. 1523–1537, 2008.

- [144] K. Takayama, M. Okabe, T. Ijiri, and T. Igarashi, "Lapped solid textures: Filling a model with anisotropic textures," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 3, pp. 53:1–53:9, Aug. 2008.
- [145] P. Tan, T. Fang, J. Xiao, P. Zhao, and L. Quan, "Single image tree modeling," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 5, pp. 108:1–108:7, Dec. 2008.
- [146] J. P. Weber, "Fast simulation of realistic trees," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 28, pp. 67–75, May 2008.
- [147] L. Lu, L. Wang, and X. D. Yang, "A flower growth simulation based on deformation," in *Information Science and Engineering, 2008. ISISE '08. International Symposium on*, vol. 2, dec. 2008, pp. 216–218.
- [148] B. Benes, N. Andryscio, and O. Stava, "Interactive modeling of virtual ecosystems," in *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, E. Galin and J. Schneider, Eds. Munich, Germany: Eurographics Association, 2009, pp. 9–16.
- [149] J. Diener, M. Rodriguez, L. Baboud, and L. Reveret, "Wind projection basis for real-time animation of trees," *Computer Graphics Forum*, vol. 28, no. 2, pp. 533–540, Apr. 2009.
- [150] R. Habel, A. Kusternig, and M. Wimmer, "Physically guided animation of trees," *Computer Graphics Forum (Proceedings EUROGRAPHICS 2009)*, vol. 28, no. 2, pp. 523–532, Mar. 2009.
- [151] S. Hu, T. Fujimoto, and N. Chiba, "Pseudo-dynamics model of a cantilever beam for animating flexible leaves and branches in wind field," *Computer Animation and Virtual Worlds*, vol. 20, no. 2-3, pp. 279–287, 2009.
- [152] W. Palubicki, K. Horel, S. Longay, A. Runions, B. Lane, R. Měch, and P. Prusinkiewicz, "Self-organizing tree models for image synthesis," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 28, no. 3, pp. 58:1–58:10, Jul. 2009.
- [153] C.-H. Teng and Y.-S. Chen, "Image-based tree modeling from a few images with very narrow viewing range," *The Visual Computer*, vol. 25, no. 4, pp. 297–307, Apr. 2009.
- [154] J. Wither, F. Boudon, M.-P. Cani, and C. Godin, "Structure from silhouettes: a new paradigm for fast sketch-based design of trees," in *Computer Graphic Forum. Special issue: Eurographics 2009*, vol. 28 (2), 2009, p. 541?550.
- [155] O. Terraz, G. Guimberteau, S. M&#x00e9;rillou, D. Plemenos, and D. Ghazanfarpour, "3gmap l-systems: an application to the modelling of wood," *Vis. Comput.*, vol. 25, pp. 165–180, January 2009.
- [156] G. Bao, X. Zhang, W. Che, and M. Jaeger, "Billboards for tree simplification and real-time forest rendering," in *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*, nov. 2009, pp. 433–440.
- [157] W. Cao and L. Zeng, "Natural tree modeling based on fractal," in *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009. FSKD '09. Sixth International Conference on*, vol. 6, aug. 2009, pp. 335–339.
- [158] L. Chang, D. Wei-long, Z. Qian-yuan, Z. Yu-ping, and L. Xiao-na, "Realistic simulation of rice panicle," in *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*, nov. 2009, pp. 261–264.

- [159] M. Cieslak, A. Seleznyova, and J. Hanan, "A functional-structural kiwifruit vine model," in *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*, nov. 2009, pp. 206–213.
- [160] P.-H. Courne' andde, T. Guyard, B. Bayol, S. Griffon, F. de Coligny, P. Borianne, M. Jaeger, and P. de Reffye, "A forest growth simulator based on functional-structural modelling of individual trees," in *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*, nov. 2009, pp. 34–41.
- [161] J. Diao, X. Lei, L. Hong, J. Rong, and Q. Shi, "Estimating single leaf area of eucalyptus (*eucalyptus grandis* x *eucalyptus urophylla*) using leaf length and width," in *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*, nov. 2009, pp. 53–57.
- [162] J. Guo and Z. Niu, "Single tree modeling and forest scene rendering with srtm and tm data," in *Image and Signal Processing, 2009. CISP '09. 2nd International Congress on*, oct. 2009, pp. 1–4.
- [163] A. Jullien, A. Mathieu, J.-M. Allirand, A. Pinet, P. de Reffye, B. Ney, and P.-H. Courne' andde, "Modelling of branch and flower expansion in greenlab model to account for the whole crop cycle of winter oilseed rape (*brassica napus* l.)," in *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*, nov. 2009, pp. 167–174.
- [164] S. Lu, C. Zhao, X. Guo, C. Li, and W. Wen, "Efficient simulating interactive deformation of virtual plant," in *Proceedings of the 2009 Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization, and Applications*, ser. PMA '09. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009, pp. 395–398. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/PMA.2009.32>
- [165] R. Sun, J. Jia, and M. Jaeger, "Intelligent tree modeling based on l-system," in *Computer-Aided Industrial Design Conceptual Design, 2009. CAID CD 2009. IEEE 10th International Conference on*, nov. 2009, pp. 1096–1100.
- [166] X. Wang, C. Zhao, S. Lu, and X. Guo, "Survey on modeling and visualization of plant leaf color," in *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*, nov. 2009, pp. 417–424.
- [167] M. Xie, W. Cao, G. Yang, and X. Huang, "Tree axis structure simplification correspondent to botanical properties," in *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*, nov. 2009, pp. 368–375.
- [168] F. Yan, S. Wang, and N. Han, "Tree modeling based on ga-fitted growth function," in *Computational Intelligence and Software Engineering, 2009. CiSE 2009. International Conference on*, dec. 2009, pp. 1–4.
- [169] M. Ramos Corchado, J. Sanchez Ruiz, F. Ramos Corchado, and J. Marcial Romero, "Growing plants for virtual 3d environments," in *Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, CCE, 2009 6th International Conference on*, jan. 2009, pp. 1–6.
- [170] D. Li, Y. Hu, X. Hu, and X. Zhang, "The design and implementation of interactive plant simulation system," in *Computational Intelligence and Software Engineering, 2009. CiSE 2009. International Conference on*, dec. 2009, pp. 1–4.
- [171] M. Kang, X. Wang, R. Qi, and P. de Reffye, "Greenscilab-crop, an open source software for plant simulation and parameter estimation," in *Open-source Software for Scientific Computation (OSSC), 2009 IEEE International Workshop on*, sept. 2009, pp. 91–95.

- [172] D. Li, V. Letort, Y. Guo, P. de Reffye, and Z. Zhan, "Modeling branching effects on source-sink relationships of the cotton plant," in *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*, nov. 2009, pp. 293–300.
- [173] T. Wei-dong and L. Ping-ping, "Research on visualization of virtual plant based on information fusion," in *Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009. AICI '09. International Conference on*, vol. 2, nov. 2009, pp. 3–6.
- [174] X. Li, X. Zheng, and Y. Li, "A new method of parameters optimization of plant growth posture," in *Information and Computing Science, 2009. ICIC '09. Second International Conference on*, vol. 4, may 2009, pp. 114–116.
- [175] X. Li, Z. Su, H. Sun, and P. Zheng, "Agent-based plant growth modeling," in *Internet Computing for Science and Engineering (ICICSE), 2009 Fourth International Conference on*, dec. 2009, pp. 6–11.
- [176] D. Shu-xing, Y. Qing, N. Hui-feng, and W. Qi-jun, "Intelligent simulation technique for interactive control plant shapes," in *Computational Intelligence and Design, 2009. ISCID '09. Second International Symposium on*, vol. 1, dec. 2009, pp. 36–39.
- [177] Y. Tang, Z. Wu, and M. Zhou, "Sketching 3d plant based on ball b-spline curves and l-system," in *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*, nov. 2009, pp. 425–432.
- [178] X. Zhao, J. Hu, and M. Kang, "Gpu accelerated plant growth modeling and visualization," in *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*, nov. 2009, pp. 441–444.
- [179] H. Yongjian, L. Jingli, W. Lichen, and Y. Gang, "Plant leaf modeling and rendering based on gpu," in *Information Science and Engineering (ICISE), 2009 1st International Conference on*, dec. 2009, pp. 1372–1375.
- [180] H. Li, X. Zhang, W. Che, and M. Jaeger, "Smooth transition between different plant leaves models," in *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*, nov. 2009, pp. 376–383.
- [181] Y. Fang, W. Wenyong, Z. Shaochun, T. Ye, and Y. Linan, "Modeling and research on growth of virtual plant wheat roots," in *Information Technology and Applications, 2009. IFITA '09. International Forum on*, vol. 2, may 2009, pp. 264–267.
- [182] S. Mondet, W. Cheng, G. Morin, R. Grigoras, F. Boudon, and W. T. Ooi, "Compact and progressive plant models for streaming in networked virtual environments," *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, vol. 5, no. 3, pp. 21:1–21:22, Aug. 2009. [Online]. Available: <http://doi.acm.org.ez45.periodicos.capes.gov.br/10.1145/1556134.1556138>
- [183] J. Gumbau, M. Chover, I. Remolar, and C. Rebollo, "View-dependent pruning for real-time rendering of trees," *Computers & Graphics*, vol. In Press, Accepted Manuscript, pp. –, 2010.
- [184] Y. Livny, F. Yan, M. Olson, B. Chen, H. Zhang, and J. El-sana, "Automatic reconstruction of tree skeletal structures from point clouds," *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH Asia 2010)*, p. to appear, 2010.
- [185] L. D. Lopez, Y. Ding, and J. Yu, "Modeling complex unfoliated trees from a sparse set of images," *Pacific Graphics 2010*, vol. 29, no. 7, 2010.

- [186] K. Takayama, O. Sorkine, A. Nealen, and T. Igarashi, “Volumetric modeling with diffusion surfaces,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 29, no. 5, p. to appear, 2010.
- [187] J. Guo and Z. Niu, “Single tree modeling and vegetation visualization using lidar data,” in *Advanced Computer Control (ICACC), 2010 2nd International Conference on*, vol. 5, march 2010, pp. 1–5.
- [188] L. Lu, W. Song, and L. Wang, “A visualization model for simulating the growth of flower and fruit,” in *World Automation Congress (WAC), 2010*, sept. 2010, pp. 223–227.
- [189] J. Yao, X. Xie, M. Zhang, H. Zhang, and A. J. A. Wang, “A 3-d flowering simulation based on botany characteristics and random generation algorithm,” in *ACM SIGGRAPH 2010 Posters*, ser. SIGGRAPH ’10. New York, NY, USA: ACM, 2010, pp. 1:1–1:1. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1836845.1836847>
- [190] L. Zeng, Q. Zhu, Q. Han, H. Qu, and Z. Lu, “Leaf mutiscale variation algorithm under feedback control system,” in *Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), 2010 3rd International Conference on*, vol. 6, oct. 2010, pp. 2418–2422.
- [191] J. Zhou, L.-T. Chen, Q.-H. Liu, Y.-M. Li, and Y.-B. Rao, “Fractal-based 3d tree modeling,” in *Computer Design and Applications (ICCD), 2010 International Conference on*, vol. 5, june 2010, pp. V5–454–V5–457.
- [192] Y. Fu, D. Ren, G. Xu, and J. Wang, “Morphogenetic models of virtual plant: A survey,” in *Automation and Logistics (ICAL), 2010 IEEE International Conference on*, aug. 2010, pp. 25–30.
- [193] C. Amati and G. J. Brostow, “Modeling 2.5d plants from ink paintings,” in *Proceedings of the Seventh Sketch-Based Interfaces and Modeling Symposium*, ser. SBIM ’10. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2010, pp. 41–48. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1923363.1923371>
- [194] D. Yan and L. Zeng, “Realistic rendering and modeling of plants,” in *Natural Computation (ICNC), 2010 Sixth International Conference on*, vol. 6, aug. 2010, pp. 3208–3212.
- [195] T. Wei-dong, L. Jin-zhong, and H. Xue-hua, “Research on virtual cucumber growth based on development model,” in *Intelligent Systems (GCIS), 2010 Second WRI Global Congress on*, vol. 2, dec. 2010, pp. 403–406.
- [196] T. Wei-dong, G. Chen, and L. Ping-ping, “Study on modeling virtual plant development process based on growth model,” in *Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI), 2010 International Conference on*, vol. 3, oct. 2010, pp. 432–435.
- [197] Z. Lina and W. Wenyong, “Research and optimization of virtual plants (maize) modeling,” in *Computer Application and System Modeling (ICCSM), 2010 International Conference on*, vol. 14, oct. 2010, pp. V14–429–V14–433.
- [198] H. Qu, Q. Zhu, M. Guo, and Z. Lu, “Simulation of carbon-based model for virtual plants as complex adaptive system,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 18, no. 6, pp. 677–695, 2010. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X10000055>
- [199] S. Lu, X. Guo, W. Wen, T. Miao, and B. Xiao, “A plug-in framework for modeling plant growth,” in *Computer Modeling and Simulation, 2010. ICCMS ’10. Second International Conference on*, vol. 2, jan. 2010, pp. 255–258.

- [200] L. Zeng and Q. Pu, “Interactive flower modeling based on phyllotactic pattern,” in *Natural Computation (ICNC), 2010 Sixth International Conference on*, vol. 8, aug. 2010, pp. 4075–4079.
- [201] F. Yan, W. Wenyong, H. Zhongwei, and Z. Tianyi, “An alhagi pseudalhagi roots model based on l-systems in virtual plant research,” in *Computer Application and System Modeling (ICCSM), 2010 International Conference on*, vol. 14, oct. 2010, pp. V14–211–V14–214.
- [202] S. B. Kang, “Image-based and sketch-based modeling of plants and trees,” in *Proceedings of the 10th Asian conference on Computer vision - Volume Part I*, ser. ACCV’10. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, pp. 350–354. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1964320.1964356>
- [203] D. Luo, X. yuan Huang, and G. Yang, “Parameterized plant builder for forest growth simulation and forest real-time rendering,” in *Computer Design and Applications (ICCSA), 2010 International Conference on*, vol. 4, june 2010, pp. V4–116–V4–120.
- [204] T. Wei-dong, L. Jin-zhong, and H. Xue-hua, “Virtual simulation of plant with individual stem based on crop growth model,” in *Natural Computation (ICNC), 2011 Seventh International Conference on*, vol. 4, july 2011, pp. 2377–2380.
- [205] G. Cerutti, L. Tougne, A. Vacavant, and D. Coquin, “A parametric active polygon for leaf segmentation and shape estimation,” in *Proceedings of the 7th international conference on Advances in visual computing - Volume Part I*, ser. ISVC’11. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, pp. 202–213. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2045110.2045133>
- [206] A. Mizoguchi and K. Miyata, “Modeling trees with rugged surfaces,” in *Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom), 2011 IEEE 10th International Conference on*, nov. 2011, pp. 1464–1471.
- [207] S. Yu and T. Zhang, “Research on static modeling of trees,” in *Complex Medical Engineering (CME), 2011 IEEE/ICME International Conference on*, may 2011, pp. 304–307.
- [208] A. Zamuda, J. Brest, B. BoÅ;koviÄ, and V. Å½umer, “Differential evolution for parameterized procedural woody plant models reconstruction,” *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 8, pp. 4904–4912, 2011. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156849461100247X>
- [209] Y. Livny, S. Pirk, Z. Cheng, F. Yan, O. Deussen, D. Cohen-Or, and B. Chen, “Texture-lobes for tree modelling,” in *ACM SIGGRAPH 2011 papers*, ser. SIGGRAPH ’11. New York, NY, USA: ACM, 2011, pp. 53:1–53:10. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1964921.1964948>
- [210] W. long Ding, H. jun Jin, Z. jun Cheng, and Q. Chen, “A visualization system for tomato plant modeling,” in *Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGIV), 2011 Eighth International Conference on*, aug. 2011, pp. 160–165.
- [211] A. Paproki, J. Fripp, O. Salvado, X. Sirault, S. Berry, and R. Furbank, “Automated 3d segmentation and analysis of cotton plants,” in *Digital Image Computing Techniques and Applications (DICTA), 2011 International Conference on*, dec. 2011, pp. 555–560.
- [212] R. Binsfeld, J. Gamboa, and M. Walter, “Visual patterns in the plant kingdom,” in *Graphics, Patterns and Images (Sibgrapi), 2011 24th SIBGRAPI Conference on*, aug. 2011, pp. 86–92.

## **ANEXO A**

### **Artigo do SIBGRAPI 2011**

(BINSFELD; GAMBOA; WALTER, 2011).

# Visual Patterns in the Plant Kingdom

R. Binsfeld, J. Gamboa, M. Walter  
 PPGC - Instituto de Informática - UFRGS  
 Porto Alegre, Brazil



Fig. 1. Real (left) and virtual (right) *Codiaeum Variegatum* generated with our approach.

**Abstract**—There has been a lot of progress in modeling and rendering elements of our Natural World for computer graphics tasks. In the Plant Kingdom, techniques for modeling the visual patterns presented in many natural objects (such as stripes on a watermelon) have advanced far less than methods for modeling the shape and reflectance properties of individual or large collections of elements (such as leaves and trees). In this paper we explore a procedural model for synthesis of many familiar visual patterns from the Plant Kingdom. Our results show that in this context a procedural model has advantages over other texturing techniques such as texture mapping and procedural noise, since these patterns are usually needed in great quantity, and at least for some plants, with many geometric variation, assigning consistent texture coordinates is a challenge. We show results for fruits, mushrooms, and small decorative plants.

**Keywords**-visual patterns; plant kingdom; clonal mosaic patterns

## I. INTRODUCTION

Among the many Natural Phenomena already addressed in computer graphics, we can say that for the Plant Kingdom the focus has been more on geometric modeling of individual shapes and collections of elements, such as trees and vegetation in general, together with reflectance properties of plant tissue. In contrast not much attention has been paid to modeling detailed visual patterns of individual elements, such as the stripes on a watermelon or spots on flowers. The usual solution for modeling these patterns uses texture mapping or, for more irregular patterns, a noise-based texturing function might be used. However, such patterns are familiar, ubiquitous,

present individual visual variation, and typically needed in great number. Although texture mapping is a common choice, we advocate that in this case a tailored procedural texturing approach might be more appropriate, since a good designed procedural model addresses these requirements. In this paper we first establish a simple taxonomy for classification of visual patterns in the Plant Kingdom and then investigate the use of a previously defined procedural model able to generate unstructured and structured visual patterns found in many plants, fruits, leaves, and vegetation in general. In Fig. 1 we illustrate one result of our approach for simulation of a small shrub known as *Codiaeum variegatum*.

## II. RELATED WORK

There has been a large body of literature addressing natural elements from the Plant Kingdom. From an exhaustive search in the main bibliographic databases such as graphbib from ACM/Siggraph and DBLP we estimate a total of approximately 150 publications. From this total, less than 6% addressed visual patterns as proposed in this paper. In this review we first highlight few approaches dealing with the many aspects of the Plant Kingdom followed by a more in depth look at the related work specific for patterns.

The Plant Kingdom first appeared in graphics as late as 1979, where the paper by Yessios [1] introduced a drafting system for wood, plants, and rocks. The pioneering paper by Vogel [2], although not published in a graphics conference or journal, introduced a mathematical formalism for modeling the seed structure of a sunflower head. Individual shapes



and collections of trees, flowers and vegetation have a long tradition in graphics mainly due to the work of Prusinkiewicz and colleagues [3], [4], [5] who extensively developed L-systems into a powerful engine for many graphics tasks in the Plant Kingdom. The reflective properties of plant tissue has also been addressed for instance by Wang and others [6], where a realtime illumination model is presented. Soler [7] and Habel [8] investigated the physics of light-matter interaction in the context of leaves. The small hairs in some plants was the goal of Fuhrer, Jensen and Prusinkiewicz [9] whereas the work by Tan *et al* [10] builds a 3D geometric model of a plant from a collection of few real images. The research in this area is still strong, as exemplified by a recent contribution for faithful reconstruction of trees from collection of points [11].

Runions and colleagues [12] presented a biologically-motivated model for synthesis of leaf venation patterns. Many striking types of venation patterns were possible by modeling the sources and distributions of hormones (auxin) on a dynamic leaf shape. Hong, Simpson, and Baranoski [13] introduced explicit 3D modeling of the veins as the main factor defining leaf shape. Their work also accounts for shape and color variation in leaves.

When it comes to flowers, Ijiri and colleagues [14] use a model with biologically-motivated constraints to achieve more realistic-looking shapes whereas [15] presents a dynamic shape model which allows modeling the full cycle of flower growth, from bud to adult shape. The work by Zhou and colleagues [16] investigated flower color patterns and share few goals with our own work. They used a reaction-diffusion system to model basic gray-scale patterns which are later translated into colors using a pigment database.

A very active area has been modeling the inner part of fruits and vegetables. Owada and others [17] presented an interactive system for modeling the surface and interior of fruits. From a set of illustrations, arbitrary cuts on the object are possible and the new information is synthesized with texture synthesis techniques. Pietroni and colleagues [18] use real images as input to a local reference frame of a 3D model. From this input new arbitrary cuts or carving the virtual object is possible. The work in [19] creates 3D internal content from user-defined 2D sketches on cross-sections which are propagated to 3D space and [20] defined the inner structure by repeatedly pasting solid texture exemplars. More recently, diffusion surfaces were introduced by Takayama and others [21] where internal illustrative representations of some fruits and vegetables are possible. Instead of using a 3D volumetric solution, they applied a modified version of positive mean value coordinates algorithm to diffuse colors inside the object from nearby surfaces. In spite of this extensive body of work, visual patterns in the Plant Kingdom remain largely unexplored.

### III. BIOLOGICAL BACKGROUND

#### A. A Possible Classification for Visual Patterns in the Plant Kingdom

Visual patterns are ubiquitous in the Plant Kingdom. From the beautiful intricate display in many flowers to simple stripes or spots, the range of variation is astonishing. In order to address the synthesis of these patterns for computer graphics tasks, we propose a simple initial taxonomy. We classify the patterns as either structured or unstructured (or random) patterns. Structured patterns exhibit regular features which allow us to quantify one or more visual cues, such as the number of stripes or number of spots. Unstructured patterns, on the other hand, have no direct way of quantifying a prominent feature and vary much among individuals. Fig. 2 exemplifies the two possibilities. The winter squash presents a regular number of stripes whereas the lungworts herb shows a blotchy pattern of lighter green irregular spots which defies a quantitative description. Most patterns are defined with only two basic colors, although more colors are possible.



(a) Winter Squash (*Cucurbita pepo*). (b) Lungworts (*Pulmonaria officinalis*).

Fig. 2. Structured and Unstructured Patterns in the Plant Kingdom.

#### B. Plant Pigments

The Plant Kingdom presents greater diversity of pigments when compared with mammals. Whereas for mammals two pigments only are responsible for visual colour diversity, in plants there are four main types: anthocyanins, betalains, carotenoids and chlorophylls [22]. Plant pigments are specialized compounds which absorb light of certain wavelengths and reflect others. They are responsible for the wide range of colors and patterns seen in many specimens of the Plant Kingdom. The colorful patterns act as attractors of animals for seeding and pollination, and specially chlorophylls and carotenoids, as part of the photosynthesis process. Some pigments have been used as food colorants and dyes, and are therefore of great utility for human life and health.

Anthocyanins, derived from flavonoids, have the wider color range, with variations in scarlet, pink, purple, and blue. They have been divided into at least six major groups, and, among their functions, they help in protecting plant tissues against excessive irradiance, preventing chloroplasts from receiving high light intensities [23]. Betalains are found only in vegetables from the *Caryophyllales* family [24]. Divided in two groups, they are known to have colors ranging from red

to violet (betacyanins) and from yellow to orange (betaxanthin) [25]. Carotenoids are the most common pigment in nature, ranging from yellow to red colors. Divided in two big groups - carotenes and xanthophylls [26], there are more than 700 different known types of carotenoids [27]. Finally, chlorophyll pigments are known for their green coloration, since they absorb mainly red and blue light, so this light can be used on the photosynthesis process. Fig. 3, show examples of Anthocyanins, Betalains and Carotenoids, respectively.



Fig. 3. Examples of Pigments.

### C. Pattern Formation in the Plant Kingdom

There has been little research addressing visual pattern formation in the Plant Kingdom, even though the background genetics is well known [28]. A welcoming exception is the work by Korn [29] where an explanation for the striped watermelon (*Citrullus lanatus*) skin is presented. Korn postulated that the Clonal Mosaic model [30] would be a possible candidate to explain such patterns. There are a large number of watermelon cultivars, estimated at more than 1200 worldwide, with variations on the basic striped pattern, and even some examples without stripes at all. Korn advanced the idea that a pre-pattern of evenly spaced vascular bundles running longitudinally could be related to the dark green stripes seen on the watermelon skin. Korn elaborated on the similarities among the watermelon striping and clonal mosaic patterns, stating that “...developmental sequence described for watermelon has the important features of the clonal mosaic model for animal coat patterns” presented in [30]. In this paper we take this possibility ahead and explore the Clonal Mosaic model as a pattern generator for various structured and unstructured visual patterns in the Plant Kingdom.

## IV. OUR MODEL

The advances in the Clonal Mosaic Model are the starting point for this investigation. For completeness, we briefly review it here. For more details we refer the reader to the original papers [30], [31]. The model assumes that the coat patterns for some mammals represent a spatial arrangement of epithelial cells - a Mosaic - where all pattern elements are derived from a single mother cell, and are therefore clones. The pattern results from the simulation of the interaction between cells of different types. The type of a cell defines its behavior in the system and although the model handles an arbitrary number of types of cells, for simulation of plant

patterns we restrict to only two types which we call foreground (represented as  $F$ ) and background (represented as  $B$ ) cells.

The information attached to a given type is: color, division rate, probability for the cell to be of a particular type, probability for the cell to switch to another type (defined for every pair of types), and adhesion, which models the strength of repulsion among cells, and is defined for every pair of types (represented as  $\alpha$ ). The current implementation of the probability functions is context-independent.

Initially, a user-supplied number of random positioned cells is spread over the 3D model’s surface. This possibility avoids the usual problems of texture mapping, such as distortions and the mapping itself, since the pattern is directly computed on the surface. The implementation assumes that the only forces acting on the cells result from cells maintaining their sizes under adhesion control. The mobility of cells is a response to these forces. Cell size is maintained by introducing a repulsive force between cells that depends on the distance between them and on the adhesion values. Equilibrium is reached by a relaxation scheme. Only cells within a given repulsive radius are considered neighbors. The repulsive radius is determined proportionally to the average ideal area for each cell and scaled by a user defined scaling value  $w_r$ . The rate of relaxation events is user controllable, and defines a day in the system. For each time step, we have  $\rho$  relaxation events. The relationship between  $\rho$  and the division rate models the relationship between cell subdivision and cell motion.

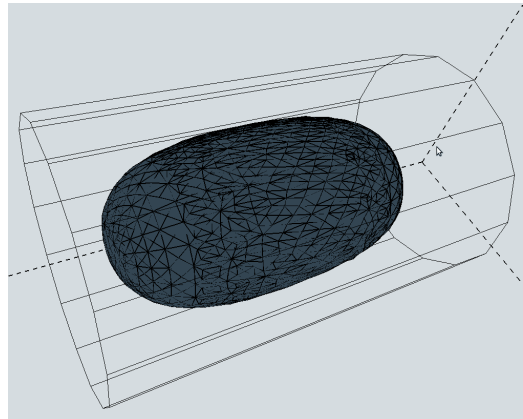


Fig. 4. Cylinder as control primitive.

During a division event one cell splits into two. We can think of these as *parent* and *child* cells. The child cell can be of a different type than its parent, based on a probability matrix given by the user. The child cell inherits all the attributes corresponding to its type. The position of the new cell is uniformly random within a circle of diameter arbitrarily chosen to be 1% of the repulsive radius centered at the position of the parent cell. The exact time for the division of a cell is given by a Poisson distribution with average equal to the rate of division for the cell. The Poisson distribution models small variations on the timing for mitosis, otherwise the cells would all split at the same time.

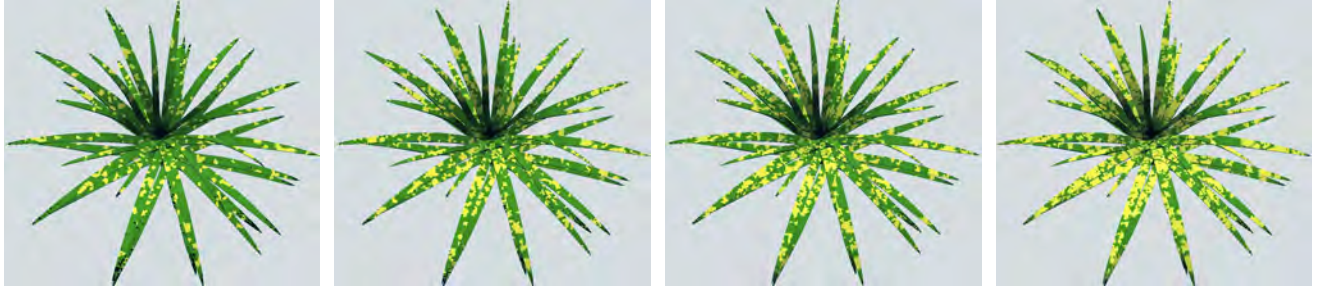


Fig. 5. Natural aging. From an almost green to an almost yellow *C. variegatum*. Total number of simulation days given by 5, 15, 20, 30.

Cells are represented as points for computation. To turn cells into a tessellation of the surface, we compute their Voronoi polygons and use them for display purposes.

In order to provide local control during the simulation we can enclose the whole object being textured, or parts of it, by cylinders. For instance, some natural objects exhibit solid colors in some parts. We can use the control provided by the cylinder to prevent patterning in the polygons covered by it. The same cylinder can control many properties of the model with the help of images attached to the cylinder. For each vertex we compute cylindrical coordinates and use these to access the corresponding position on a image controlling a given feature. Fig. 4 shows a watermelon object and its control cylinder.

## V. RESULTS AND DISCUSSION

In this section we illustrate the flexibility of the model for pattern generation and compare our results with techniques which could, in principle, be applied towards the same results. Our implementation is not yet GPU-friendly and therefore our results vary from few seconds to 35 minutes in some cases. In Table I we present the main parameters used. The final Clonal Mosaic pattern is expressed as a collection of Voronoi polygons. In order to color these polygons, each cell type will have an assigned RGB color which we hand-picked from images of the target fruit or plant.

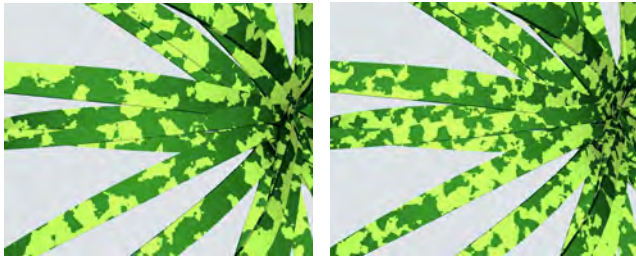


Fig. 6. Result applying noise and trying to simulate pattern evolution through time. Compare this with the result in Fig. 7.

In Fig. 1 we show side by side a real and virtual shrub known as *Codiaeum variegatum*. We can see that the procedural clonal mosaic texture is visually similar to the real

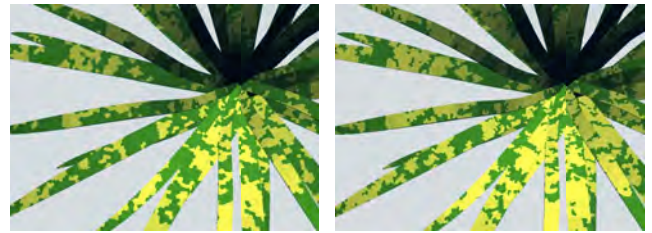


Fig. 7. Pattern aging through time with the Clonal Mosaic simulation. The group of cells defining a blotch expands its border consistently.

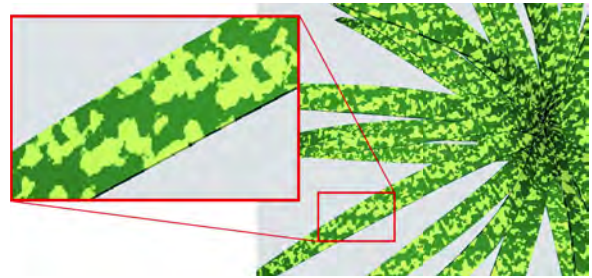


Fig. 8. Noise Repetition. Another potential drawback of using noise for the types of patterns addressed in our work.

pattern. The sequence in Fig. 5 illustrates another possible advantage of a controlled procedural technique. We can follow the development of the pattern through time, as the plant ages. In this sequence we show snapshots of the same simulation taken at increasingly number of days, from 5 to 30 days. The pattern changes from almost totally green to mostly yellow, mimicking the real aging of this plant.

Since the unstructured patterns are very irregular, we investigated how well we could generate some of the results with procedural Perlin Noise. While it is true that some results could indeed be generated this way, we noticed some limitations in procedural noise that our model does not have. Our approach based on cells allows a continuous and coherent growth of a group of cells, whereas with noise we do not have fine control over scale of the elements. This drawback is illustrated in Fig. 6 and Fig. 7. Increasing the scale of noise does not guarantee that contiguous areas will increase

TABLE I  
VALUES OF PARAMETERS.

Figure	Days	$w_r$	Cells	$\alpha_{FF}$	$\alpha_{BB}$	Division FF	Division BB
Fig. 1	35	1.0	2000	0.5	0.8	10	10
Fig. 5	5-15-20-30	1.0	10000	0.5	0.8	5	10
Fig. 9	30	1.0	2000	0.5	0.8	10	10
Fig. 12	20	1.0-2.0-3.0	10000	0.5	0.9	5	10
Fig. 10	20	0.5	10000	0.5	0.9	5	10
Fig. 11	20	0.5	10000	0.5	0.9	5	10
Fig. 13	20	3.0	6000	0.7	0.9	6-8-20	8



Fig. 9. Individual visual variation provided by the model.

consistently, as they do in the Clonal Mosaic result.

Another potential drawback of procedural noise is the repetition of elements. In Fig. 8 we illustrate this problem where the same irregular yellow blotch repeats itself. This effect is distracting and highly noticeable. The Clonal Mosaic patterns do not show this same problem.

One advantage of procedural models is their power to generate many individual variations of the same pattern. In Fig. 9 we illustrate this possibility with three unique individuals of the same *C. variegatum* species. They all share the same simulation parameters, but with different seeds for the random number generator.

The second set of examples uses the watermelon as target object. Fig. 10 illustrates a more common type of spherical watermelon whereas the result in Fig. 11 shows an exotic and expensive type known as square watermelon, mainly grown in Japan by letting the fruit develop inside a glass box. From these two examples, we can see that the Clonal Mosaic patterns adapt easily to different geometries.

As previously mentioned, watermelons present a great variation in appearance. A procedural model can easily handle, for instance, stripes of various widths, as exemplified in Fig. 12. For these results, we used an increasing value for the weight of the repulsive radius, since a higher radius allows more cells in the neighborhood computation. For all watermelons results, we used an image with stripes attached to the control cylinder. This image, illustrated as an inset in the leftmost watermelon in Fig. 12 defined the spatial position of initial stripes on the watermelon's surface. The sequence in Fig. 13 illustrates the pattern on a type of fungi known as *Amanita muscaria*. These

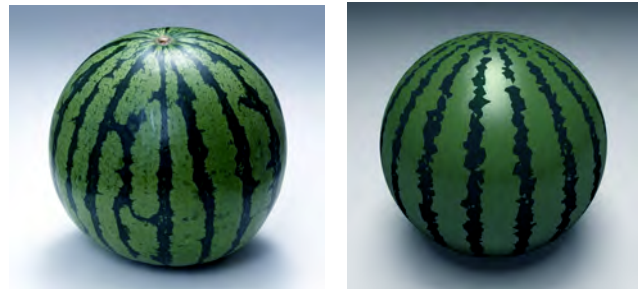


Fig. 10. Spherical watermelon.



Fig. 11. Example of cube watermelon.

do not belong to the Plant Kingdom, but nevertheless we show that Clonal Mosaic patterns can also be used in this case. This result also illustrates the use of cylinders to control the final pattern. A texture map was used to control where cells could

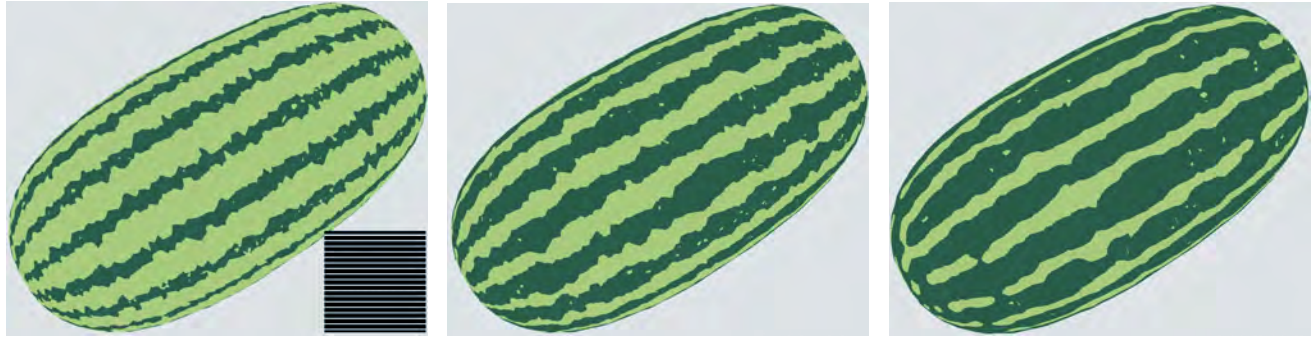


Fig. 12. Example of watermelon *Citrullus lanatus* with increasing width for the stripes.



Fig. 13. Variations for the red mushroom *Amanita muscaria*. The black and white inset in the first virtual mushroom shows the texture map used to create cells only in the mushroom's head.

be created, only in the mushroom's head.

## VI. CONCLUSIONS

In this paper we explored the potential of the Clonal Mosaic model as a procedural engine for synthesis of visual patterns in the Plant Kingdom. We illustrate the potential of the model with results for two-color structured and unstructured visual patterns such as stripes on watermelons and irregular blotches on plants. We consider these results evidence that the Clonal Mosaic model is a good candidate to render visual patterns in the Plant Kingdom, but much more is needed. We have to extend the investigation to account for more than two color patterns and other more complicated pigment distribution as seen in some flowers. Another possibility is to couple the pattern formation process with the growing of the fruit or plant, allowing a dynamic patterning mechanism governed by growth data.

## ACKNOWLEDGMENTS

Our thanks to Guilherme N. Oliveira for providing us with noise code, and Marcelo Malheiros for his expertise with Blender. Work partially funded by CNPq grant 478050/2010.

## REFERENCES

- [1] C. I. Yessios, "Computer drafting of stones, wood, plant and ground materials," in *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 79)*, Aug. 1979, pp. 190–198.
- [2] H. Vogel, "A better way to construct the sunflower head," *Mathematical Biosciences*, vol. 44, no. 3-4, pp. 179 – 189, 1979.
- [3] P. Prusinkiewicz and A. Lindenmayer, *The algorithmic beauty of plants*. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 1996.
- [4] P. Prusinkiewicz, L. Mündermann, R. Karwowski, and B. Lane, "The use of positional information in the modeling of plants," in *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001*, ser. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, Aug. 2001, pp. 289–300.
- [5] O. Deussen, P. M. Hanrahan, B. Lintermann, R. Mech, M. Pharr, and P. Prusinkiewicz, "Realistic modeling and rendering of plant ecosystems," in *Proceedings of SIGGRAPH 98*, ser. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, Jul. 1998, pp. 275–286.
- [6] L. Wang, W. Wang, J. Dorsey, X. Yang, B. Guo, and H.-Y. Shum, "Real-time rendering of plant leaves," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, pp. 712–719, Aug. 2005.
- [7] C. Soler, F. X. Sillion, F. Blaise, and P. Deraffey, "An efficient instantiation algorithm for simulating radiant energy transfer in plant models," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 22, no. 2, pp. 204–233, Apr. 2003.
- [8] R. Habel, A. Kusternig, and M. Wimmer, "Physically based real-time translucency for leaves," in *Rendering Techniques 2007 (Proceedings Eurographics Symposium on Rendering)*, J. Kautz and S. Pattanaik, Eds., Eurographics. Eurographics Association, Jun. 2007, pp. 253–263.
- [9] M. Fuhrer, H. W. Jensen, and P. Prusinkiewicz, "Modeling hairy plants," in *12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, Oct. 2004, pp. 217–226.
- [10] P. Tan, G. Zeng, J. Wang, S. B. Kang, and L. Quan, "Image-based tree modeling," *ACM Trans. Graph.*, vol. 26, pp. 87–1–87–7, July 2007.
- [11] Y. Livny, S. Pirk, Z. Cheng, F. Yan, O. Deussen, D. Cohen-Or, and B. Chen, "Texture-lobes for tree modelling," *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2011)*, 2011.
- [12] A. Runions, M. Fuhrer, B. Lane, P. Federl, A.-G. Rolland-Lagan, and P. Prusinkiewicz, "Modeling and visualization of leaf venation patterns," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, pp. 702–711, Aug. 2005.
- [13] S. M. Hong, B. Simpson, and G. V. G. Baranoski, "Interactive venation-

- based leaf shape modeling.” *Computer Animation and Virtual Worlds*, vol. 16, no. 3-4, pp. 415–427, 2005.
- [14] T. Ijiri, S. Owada, M. Okabe, and T. Igarashi, “Floral diagrams and inflorescences: interactive flower modeling using botanical structural constraints,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, pp. 720–726, Aug. 2005.
- [15] T. Ijiri, M. Yokoo, S. Kawabata, and T. Igarashi, “Surface-based growth simulation for opening flowers,” in *Graphics Interface 2008*, May 2008, pp. 227–234.
- [16] N. Zhou, W. Dong, J. Wang, and J.-C. Paul, “Modeling and visualization of flower color patterns,” in *Proceedings of the Tenth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphic*, 2007, pp. 150–155.
- [17] S. Owada, F. Nielsen, M. Okabe, and T. Igarashi, “Volumetric illustration: designing 3d models with internal textures,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 23, no. 3, pp. 322–328, Aug. 2004.
- [18] N. Pietroni, M. A. Otaduy, B. Bickel, F. Ganovelli, and M. Gross, “Texturing internal surfaces from a few cross sections,” *Computer Graphics Forum*, vol. 26, no. 3, pp. 637–644, Sep. 2007.
- [19] S. Owada, T. Harada, P. Holzer, and T. Igarashi, “Volume painter: Geometry-guided volume modeling by sketching on the cross-section,” in *EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling*, 2008, pp. 1–8.
- [20] K. Takayama, M. Okabe, T. Ijiri, and T. Igarashi, “Lapped solid textures: Filling a model with anisotropic textures,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 3, pp. 53:1–53:9, Aug. 2008.
- [21] K. Takayama, O. Sorkine, A. Nealen, and T. Igarashi, “Volumetric modeling with diffusion surfaces,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 29, no. 5, p. to appear, 2010.
- [22] W. G. Hopkins, *Introduction to Plant Physiology*. Willey, 2003.
- [23] N. T.S.Feild, D.W.Lee, “Why leaves turn red in autumn. the role of anthocyanins in senescing leaves of red-osier dogwood,” *Plant Physiology*, vol. 127, pp. 5666–5674, 2001.
- [24] A. Y.Tanaka, N.Sasake, “Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids.” *The Plant Journal*, vol. 54, pp. 733–749, 2008.
- [25] E. Grotewold, “The genetics and biochemistry of floral pigments.” *Annual Review of Plant Biology*, pp. 761–780, 2006.
- [26] R. F.C.Stintzing, “Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition.” *Trends in Food Science & Technology*, vol. 15, pp. 19–38, 2004.
- [27] C. D.R.Ort, *Oxygenic Photosynthesis: The Light Reactions*. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [28] G. Gusmini and T. C. Wehner, “Genes determining rind pattern inheritance in watermelon: a review.” *American Society for Horticultural Science*, vol. 40, pp. 1928–1930, 2005.
- [29] R. W. Korn, “Watermelon stripes. a case for the clonal mosaic model in plants.” *Journal of Theoretical Biology*, vol. 247, no. 4, pp. 859–861, 2007.
- [30] M. Walter, A. Fournier, and M. Reimers, “Clonal mosaic model for the synthesis of mammalian coat patterns,” in *Graphics Interface’98*, 1998, pp. 82–91.
- [31] M. Walter, A. Fournier, and D. Menevaux, “Integrating shape and pattern in mammalian models,” in *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ser. SIGGRAPH ’01. New York, NY, USA: ACM, 2001, pp. 317–326.