UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DANIEL CAIO DE LIMA

**Avaliação do vigor e germinação de sementes de soja a partir da
análise de imagens de plântulas**

São Carlos
2015

DANIEL CAIO DE LIMA

**Avaliação do vigor e germinação de sementes de soja a partir da
análise de imagens de plântulas**

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Ciências, Programa de Engenharia Elétrica

Área de concentração: Processamento de
Sinais e Instrumentação

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luis
Linhari Rodrigues

São Carlos

2015

**Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na
EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

L732a Lima, Daniel Caio de
 Avaliação do vigor e germinação de sementes de soja
 a partir da análise de imagens de plântulas / Daniel
 Caio de Lima; orientador Evandro Luis Linhari
 Rodrigues. São Carlos, 2015.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
 Processamento de Sinais e Instrumentação -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
 2015.

 1. vigor de sementes. 2. processamento de imagens.
 3. agricultura de precisão. 4. plântulas de soja. I.
 Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Tecnólogo **DANIEL CAIO DE LIMA**.

Título da dissertação: "Avaliação do vigor e germinação de sementes de soja a partir da análise de imagens de plântulas".

Data da defesa: 11/03/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Evandro Luis Linhari Rodrigues**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado.

Prof. Dr. **Celso Aparecido de França**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Dr. **Lúcio André de Castro Jorge**
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me concedeu a oportunidade de participar deste desafio em minha vida, estando sempre ao meu lado, assim como Nossa Senhora, que sempre intercedeu por mim. Agradeço ao apoio de meus pais e minha irmã, Edna, Elio e Suzane, que apesar de todas as dificuldades sempre estiveram ao meu lado e me incentivaram a concluir esta etapa. Também agradeço a paciência e compreensão que tiveram em muitos momentos.

Agradeço ao Prof. Dr. Evandro Luis Linhari Rodrigues por ter aceitado o desafio de me orientar neste trabalho, por disponibilizar parte do seu tempo a mim e a este trabalho de pesquisa.

Ao Dr. Lúcio André de Castro Jorge, que também cedeu parte do seu tempo disponível para me coorientar, pelo incentivo à pesquisa e pela confiança em meu trabalho. Agradeço também a Embrapa Instrumentação, por ceder à infra-estrutura e os recursos necessários para a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Francisco Guilhien Gomes Junior, pela sua importante participação neste trabalho de pesquisa.

Por fim, não menos importante, agradeço a todos os meus companheiros e amigos que passaram pelo Laboratório de Imagens da Embrapa Instrumentação durante o período de conclusão desta pesquisa.

RESUMO

LIMA, D. C. **Avaliação do vigor e germinação de sementes de soja a partir da análise de imagens de plântulas**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

A cultura de soja desempenha um papel importante na economia nacional, por isso seria importante o estabelecimento de métodos de testes precisos que pudessem auxiliar na determinação da qualidade das sementes para definição do destino certo de um lote, direcionando-o para plantio ou alimentação. Testes de vigor são testes que levam em consideração a relação entre a semente e o ambiente de semeadura e complementam os resultados de testes de germinação, descrevendo o potencial que um lote de sementes possui para o desenvolvimento de plântulas normais sob um amplo conjunto de condições ambientais. O método clássico para avaliação da germinação e do vigor de sementes baseia-se na inspeção visual das plântulas após um período de germinação sendo um processo demorado e subjetivo, assim, neste trabalho é proposta uma novo método para automatizar a avaliação da germinação e do vigor de um lote de sementes de soja com base no desenvolvimento das plântulas, por meio da análise de imagens digitais. As imagens deste experimento são capturadas por um *scanner* e depois são submetidas a procedimentos para que se possam extrair as características relevantes para calcular o vigor. Foram avaliados três métodos para segmentar as imagens baseados nos modelos de cor RGB, HSV e imagens geradas pelo resultado de operações matemáticas entre canais dos dois modelos, foram testadas duas metodologias para separar o cotilédone da raiz em plântulas, sendo uma baseada no detector de bordas Canny e outra no detector de cantos SUSAN. Para calcular o índice de vigor, foram utilizadas equações propostas por outro Sako e também foi desenvolvida uma equação baseada no processo de irrigação de solo para análise de uniformidade do comprimento de plântulas. Como resultados obtiveram-se uma média de 91% de cotilédones removidos corretamente das imagens e uma nova equação que melhor representa a uniformidade e elimina a subjetividade humana.

Palavras-chave: vigor de sementes, processamento de imagens, agricultura de precisão, plântulas de soja.

ABSTRACT

LIMA, D. C. **Vigor and germination assessment of soybean seeds from image analysis of seedlings**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Soybean plays an important role in the national economy, so it would be important to establish accurate methods that can assist in determining the quality of seeds to define the right destination to the seed lots, directing it to planting or feeding. Vigor tests are tests that consider the relationship between the environment and seed and complement germination tests results, describing the potential that seed lot has for developing normal seedlings under a wide range of environmental conditions. The classic methods to evaluate seed germination and vigor are based in visual inspection after a germination period, taking much time and it is a subjective task, thus this paper purposes a new method to automatize seed germination and vigor assessment based on seedlings growth using digital images analysis. Images for this experiment are captured by a scanner and then they are submitted to procedures which can extract relevant characteristics to calculate vigor and germination. Three different methods were tested to segmentate images using RGB and HSV color models and images created by results of mathematical operations among arrays of this two color models, having two methodologies to cotyledon from root in seedlings, being one based on Canny edge detector and another based in SUSAN corner detector. To calculate vigor index were tested equations purposed by another authors and also purposes using an equation developed to soil irrigation adapted for assess length uniformity of seedlings. As results we obtained an average of 91% of cotyledons removed properly from images and a new equation that best represents the uniformity of a seed lot and eliminates human subjetivity.

Key words: seed vigor, digital image processing, precision agriculture, soybean seedlings.

Lista de Figuras

Figura 1 - Plântula de soja com três dias de germinação.....	23
Figura 2 - Representação do cubo de cores RGB. Adaptado de (GONZALEZ & WOODS, 2010).	27
Figura 3 – Representação cônica do espaço HSV (CHAVES-GONZÁLEZ et al., 2009).....	27
Figura 4 – Quatro máscaras circulares em diferentes posições de um retângulo (SMITH & BRADY, 1997).	30
Figura 5 – Conjunto de elementos estruturantes usados no afinamento pela transformação Hit-Miss.	33
Figura 6 - Conjunto 1 de elementos estruturantes para realização do <i>pruning</i>	34
Figura 7 - Conjunto 2 de elementos estruturantes para realização do <i>pruning</i>	34
Figura 8 – Exemplo de gabarito fornecido pela ESALQ.	35
Figura 9 – Divisão da metodologia.	36
Figura 10 – Scanner utilizado nesta abordagem.	37
Figura 11 – Imagens dos canais R (a), G (b) e B (c).....	38
Figura 12 – Exemplo de thresholding do canal G.....	38
Figura 13 – Imagens dos canais H (a), S (b) e V (c).	39
Figura 14 – Exemplo de thresholding do canal H.....	39
Figura 15 – Subtração entre canais RGB (a), subtração dos canais HSV (b), subtração dos canais RGB dos canais HSV (c) e subtração dos canais HSV dos canais RGB.	40
Figura 16 – Exemplo de subtração da imagem do canal S (espaço HSV) da imagem do canal G (espaço RGB).....	40
Figura 17 – Imagem segmentada.	41
Figura 18 – Bordas detectadas pelo detector de Canny.	42
Figura 19 - Regiões de interesse para detecção de cantos.	42
Figura 20 - Pontos detectados pelo detector de Harris.	43
Figura 21 - Pontos detectados pelo detector SUSAN.....	44
Figura 22 – Ponto externo fora da região de interesse (círculo vermelho) e ponto externo dentro da região de interesse (círculo azul).	45
Figura 23 – Comparação entre distâncias (eixos X e Y) entre pontos externos e a região de interesse.	46
Figura 24 – Pontos detectados (a) e reta traçada (b).....	46
Figura 25 – Aplicação em plântulas com múltiplas regiões. Pontos detectados (a) e retas traçadas (b).	47
Figura 26 – Plântula extraída da imagem binária.....	48
Figura 27 – Mapa de distâncias.....	49
Figura 28 – Afinamento da imagem binária da plântula.....	49
Figura 29 - Processo de remoção do cotilédone. Imagem pós afinamento (a), imagem após remoção de cotilédone (b) e imagem após <i>pruning</i> (c).	50
Figura 30 – Mapa de distâncias gerado por meio da Distância Euclidiana.	51
Figura 31 – Resultado do teste A: sobreposição dos esqueletos sobre a imagem original. Hipocótilo em azul, raiz primária em vermelho.	54
Figura 32 – Exemplo de cotilédone removido erroneamente devido à justaposição entre o mesmo e sua raiz.	55

Figura 33 – Local de transição das partes da plântula. (a) Resultado do método automático (Teste A). (b) Região aceita para a localização do ponto de transição.	55
Figura 34 - Resultado do teste B: sobreposição dos esqueletos sobre a imagem original. Hipocótilo em azul, raiz primária em vermelho.	56
Figura 35 – Local de transição das partes da plântula. (a) Resultado do método automático (Teste B). (b) Região aceita para a localização do ponto de transição.	57
Figura 36 – Resultado do teste C: sobreposição dos esqueletos sobre a imagem original. Hipocótilo em azul, raiz primária em vermelho.	58
Figura 37 - Resultado do teste D: sobreposição dos esqueletos sobre a imagem original. Hipocótilo em azul, raiz primária em vermelho.	60
Figura 38 – Exemplos de acerto para os dois métodos.	61
Figura 39 – Exemplos de erros para os dois métodos.	61
Figura 40 – Resultado do teste E: sobreposição dos esqueletos sobre a imagem original. Hipocótilo em azul, raiz primária em vermelho.	62
Figura 41 – Resultados do método de separação do cotilédone/raiz. (a) Teste D e (b) Teste E.	63
Figura 42 – Lote com 100% de cotilédones separados corretamente (Cor-de-rosa).	64
Figura 43 – Lote com 100% de cotilédones separados corretamente (Azul).	65
Figura 44 – Lote com 75% de cotilédones separados corretamente (Cor-de-Rosa).	65
Figura 45 – Lote com 80% de cotilédones separados corretamente (Azul).	66
Figura 46 – Pesos utilizados para o cálculo do índice de vigor.	67
Figura 47 – Lote de alta uniformidade e vigoroso.	67
Figura 48 – Resultado do processamento do <i>software</i> com lote da Figura 47.	68
Figura 49 – Lote de alta uniformidade e crescimento.	69
Figura 50 – Resultado do processamento do <i>software</i> com lote da Figura 49.	70

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características para cálculo do índice de vigor de lote de sementes extraídas pelo teste A, em <i>pixels</i>	54
Tabela 2 – Características para cálculo do índice de vigor de lote de sementes extraídas pelo teste B, em <i>pixels</i>	56
Tabela 3 – Características para cálculo do índice de vigor de lote de sementes extraídas pelo teste C, em <i>pixels</i>	58
Tabela 4 – Características para cálculo do índice de vigor de lote de sementes extraídas pelo teste D, em <i>pixels</i>	60
Tabela 5 – Características para cálculo do índice de vigor de lote de sementes extraídas pelo teste E, em <i>pixels</i>	62
Tabela 6 – Resumo do resultado dos testes realizados.....	64
Tabela 7 – Resultados do cálculo da Uniformidade, do Crescimento e do índice de Vigor de um lote de sementes pelas equações de Sako.....	68
Tabela 8 – Resultados do cálculo da Uniformidade de Christiansen adaptada, do Crescimento e do índice de Vigor de um lote de sementes pelas equações de Sako.....	68
Tabela 9 – Resultados do cálculo da Uniformidade de Christiansen adaptada, do Crescimento e do índice de Vigor de um lote de sementes pelas equações de Sako em papel Azul.....	69

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo	19
1.2 Organização do Trabalho	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Testes de Vigor	21
2.2 Equação para cálculo do índice de Vigor	24
2.3 Espaços de Cor.....	25
2.3.1 Espaço RGB.....	26
2.3.2 Espaço HSV	27
2.4 Detectores de Cantos	29
2.4.1 Detector Harris	29
2.4.2 Detector SUSAN	30
2.5 Morfologia Matemática	31
2.5.1 Transformação Hit-Miss	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Aquisição da Imagem	36
3.2 Segmentação e Separação dos Blobs	37
3.3 Individualização dos <i>Blobs</i>	47
3.4 Extração das Características	48
3.5 Cálculo do Índice de Vigor	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5. CONCLUSÕES.....	71
6. TRABALHOS FUTUROS.....	73
TRABALHOS PUBLICADOS	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
APÊNDICE A.....	81
APÊNDICE B	83
APÊNDICE C	85

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a cultura de soja ocupa cerca de 30,24 milhões de hectares de área plantada, apresentando rendimento de 2.852 kg por hectare (IBGE, 2015), tendo grande importância econômica para o Brasil.

Devido à importância deste grão, devem ser tomados cuidados para que a qualidade dos grãos não seja afetada. Segundo Martins e Carvalho (1994), além de condições climáticas durante a maturação e a colheita, as principais causas do decréscimo da qualidade das sementes são o manejo inadequado dos grãos durante a colheita, o armazenamento prolongado em condições irregulares, a aplicação de substâncias químicas e os ataques de microrganismos e outras pragas.

A análise da qualidade em sementes surgiu da necessidade de corrigir problemas encontrados na comercialização de sementes na Europa na segunda metade do século XIX, resultando, em 1869, na criação do primeiro laboratório de sementes na Alemanha e, posteriormente, o primeiro manual de análise de sementes. Em 1897, surgiram na América procedimentos iniciais para efetuar testes de pureza e de germinação, dando origem às primeiras regras para análise de sementes.

Com o surgimento da análise de sementes, foi necessário estabelecer e padronizar os métodos e procedimentos que a envolvem. Em 1908, analistas de sementes fundaram a Associação de Analistas Oficiais de Sementes da América do Norte, hoje conhecida como Associação de Analistas Oficiais de Semente (AOSA), regulamentando a comercialização de sementes nos Estados Unidos e Canadá, publicando anos depois sua primeira regra para análise de sementes. De forma análoga, foi fundada em 1924 a Associação Internacional de Análise de Sementes (ISTA), tendo como principais objetivos desenvolver, estabelecer e publicar procedimentos padrões para amostragem e análise de sementes, desenvolver pesquisas na área de tecnologia de sementes e manter contato com organizações com ligação a esta área.

No Brasil, em 1956, surgiram às primeiras normas para análise de sementes e, em 1967, o Ministério da Agricultura publicou as primeiras Regras para Análise de Sementes (RAS) brasileiras, elaborada com base nas regras da AOSA e da ISTA, sendo assim, a partir de 1997, o Ministério da Agricultura determinou que as análises de sementes para o comércio nacional e internacional devem estar de acordo com as regras da ISTA.

Independente da origem, as regras para análise de sementes contêm os procedimentos básicos para a obtenção de amostras, métodos de avaliação, interpretação e indicação de

resultados de análises de lotes de sementes para a produção e comércio, possibilitando a padronização de procedimentos entre analistas de sementes. Segundo Novembre (2001), a principal finalidade da análise de sementes é a de determinar a qualidade de um lote de sementes e o seu valor para a semeadura. Os resultados de uma análise são úteis na emissão de etiquetas de embalagens de sementes para fiscalização comercial e normatização do produto, estabelecer bases para o beneficiamento, para o armazenamento e distribuição de sementes. A análise também é útil em trabalhos de pesquisa e na identificação de problemas relacionados à qualidade e suas respectivas causas.

Além dos métodos de análise que existem nas regras de análise de sementes, como testes de germinação e testes de tetrazólio (considerados incompletos, pois não levam em consideração aspectos da relação entre a semente e o ambiente), outros testes estão disponíveis para complementar a análise de qualidade, como os testes de vigor, que avaliam ou detectam diferenças na qualidade fisiológica de lotes com germinação semelhante e diferenciam lotes de alto e baixo vigor, dentro de uma porcentagem adequada para a comercialização.

Vigor de sementes é definido pela ISTA como sendo a soma de todas as propriedades que determinam o nível de atividade e desempenho das sementes ou de um lote de sementes em situação de germinação e emergência de plântulas. A AOSA define vigor de sementes como sendo um conjunto de propriedades que determinam o potencial para uma emergência rápida e uniforme, desenvolvendo plântulas normais em um conjunto amplo de condições ambientais (OLIVEIRA et al. 2009). De modo mais simples, vigor de sementes é um valor quantitativo ou qualitativo que descreve a qualidade de um lote de sementes baseado no crescimento da semente. Analistas geralmente determinam o vigor de um lote de sementes pela inspeção visual da velocidade e da uniformidade do crescimento das plântulas (desempenho da plântula) ou pelas medidas manuais de certas características da semente ou plântula.

Segundo Marcos Filho (1999), os testes de vigor representam um parâmetro importante para a caracterização da qualidade fisiológica de sementes, foram criados para fornecer informações adicionais aos testes de germinação e não para substituí-lo.

Testes de vigor têm como objetivos básicos (MARCOS FILHO, 1999):

- Avaliar ou detectar diferenças significativas na qualidade fisiológica de lotes de sementes com germinação semelhante, complementando as informações obtidas de testes de germinação.

- Distinguir lotes de alto vigor dos de baixo vigor, pois lotes podem apresentar respostas semelhantes aos lotes mais vigorosos ou menos vigorosos. É necessária a diferenciação entre estes lotes para que se possa executar o manejo adequado após a colheita ou o possível descarte do lote para não agravar a possibilidade de gerar prejuízos a produtores e consumidores.
- Separar ou classificar lotes em diferentes níveis de vigor, de modo proporcional ao comportamento quanto à emergência das plântulas, resistência ao transporte e potencial de armazenamento, pois a emergência das plântulas em campo depende diretamente do histórico dos lotes e das condições do ambiente, condições estas que não são controláveis. Assim, a avaliação do vigor deve ser feita de forma que seja possível identificar de maneira precisa os lotes que têm maior potencial para se estabelecer no campo.

Apesar de parecer relativamente simples, existem algumas dificuldades para se alcançar os objetivos descritos acima, como, por exemplo, o fato do vigor refletir um conjunto de características determinantes do potencial de emergência sob diversas condições ambientais torna difícil o desenvolvimento de um único teste com capacidade de indicar precisamente o potencial de desempenho das sementes, expressando características distintas e tentar estabelecer uma relação com o que ocorrerá no campo, ou durante o armazenamento. Outra dificuldade encontrada é relacionada à quantificação do vigor, pois os resultados de teste de vigor são comparativos entre sementes da mesma espécie e cultivar, não sendo quantificáveis, o que gera dificuldades tanto para compreender seu significado quanto para comparar informações obtidas por diferentes testes. O que se tem feito em relação a isso é o uso de índices que facilitam a interpretação e o uso dos resultados dos testes.

Os testes de vigor devem apresentar uma base teórica consistente e, além disso, devem ser simples, para serem usados em diferentes ambientes sem exigir investimentos de alto custo, fornecer respostas rápidas, para a tomada de decisões usadas em programas de controle de qualidade pós-colheita e devem possibilitar a comparação entre analistas ou ambientes diferentes.

Os resultados dos testes de vigor não determinam o número exato de sementes que germinará em campo sob diferentes condições ambientais. Marcos Filho (1999) diz que “um resultado de 85% no teste de frio não significa que 85% das plântulas vão sobreviver no campo, mas sim que um lote com 85% de germinação, após o teste de frio, tem maior

probabilidade de sobreviver em campo, sob estresse, que um lote onde o resultado tenha sido de 70%”.

As aplicações de imagens digitais no ramo de sementes foram iniciadas no estudo de raízes, incluindo o uso de softwares genéricos de processamento de imagens digitais para medir o comprimento de raízes de diversas espécies.

Em 1990, uma pesquisa feita por McCormac et al. discutia o uso de um sistema de avaliação automática de vigor para lotes de sementes de alface, usando uma câmera para capturar imagens em escala de cinza de cinco plântulas germinadas em um prancha inclinada com papel mata-borrão. Em cada uma das imagens capturadas era aplicada a limiarização para se obter as formas das plântulas e o comprimento da plântula era medido com o auxílio de uma linha de referência, traçada manualmente no papel mata-borrão. Como em cada imagem só existiam cinco plântulas, era necessário capturar várias imagens com cinco plântulas agrupadas para poder-se analisar o vigor do lote. Cada uma das plântulas era medida individualmente e depois usada à média do comprimento do lote de sementes para a avaliação do vigor. O sistema se mostrou tão eficiente quanto o método tradicional.

Howarth e Stanwood (1993) descrevem um sistema de visão computacional para medir a taxa de crescimento da plântula de alface e sorgo durante todo o período de germinação. O sistema consistia de quatro lâmpadas fluorescentes colocadas dentro da câmara de germinação, com temperatura e umidade controladas, posicionadas duas de cada lado da prancha inclinada com as sementes, e uma câmera coberta com um tecido preto, posicionada em frente à câmara. De hora em hora, as lâmpadas eram acesas e a câmera era ligada por cerca de 30 segundos, capturando imagens da prancha inclinada e estas armazenadas. Na prancha inclinada foram colocados dois pinos com 10 cm de distância entre eles, usados para converter a distância em *pixels* para centímetros. Foram aplicadas técnicas de limiarização, algoritmos de detecção de bordas e a distância Euclidiana no processo de calibração. Para a localização e extração das raízes foi considerada como sendo uma raiz duas transições entre linhas de *pixels* brancos em uma imagem binária.

No final da mesma década, surgiram *softwares* comerciais para avaliar o vigor de sementes, como o *Ball Vigor Index* (CONRAD, 1997), que realiza medidas da área das folhas de plântulas através de imagens com um visão do topo da plântula; e o McNertney System (MCNERTNEY, 1999), que avalia o vigor através das medidas da área das raízes, também com imagens com a visualização das plântulas pelo topo.

Sako (2000) desenvolveu um sistema de avaliação de vigor (SVIS – *Seed Vigor Image System*) através de imagens digitais capturadas por um *scanner*. Nesta abordagem, 50

sementes de alface foram germinadas em papel mata-borrão azul dentro de uma caixa vedada (para diminuir a perda de umidade) a 20°C durante três dias, sem deixar luz entrar no germinador. As técnicas utilizadas neste trabalho foram a limiarização, esqueletização e algoritmos desenvolvidos para separar plântulas no caso de sobreposição de estruturas e remoção dos cotilédones, possibilitando a mensuração das estruturas e o cálculo do índice de vigor.

Hoffmaster et al. (2003) descreve uma adaptação do sistema Sako (2001) para avaliação do vigor de plântulas de soja com três dias de germinação, usando uma associação do formato gerado pelo esqueleto das plântulas com letras do alfabeto (I, T, Y, P, A e M) para remover o cotilédone, em cada tipo há um método para a remoção. Outros resultados de testes de vigor utilizando o SVIS são relatados por Marcos Filho et al. (2009) e Silva et al. (2012). Os métodos descritos anteriormente não destacam os resultados alcançados, ou por se tratar de métodos sob patentes ou por admitir que os resultados são semelhantes aos realizados manualmente.

Os sistemas computacionais de avaliação do vigor de sementes existentes não classificam cada uma das plântulas em suas categorias, como plântulas normais, anormais ou sementes não germinadas, sendo esta classificação útil para avaliar a porcentagem de germinação do lote de sementes, informação utilizada para definir se o lote de sementes será utilizado para semeadura ou para alimentação humana ou animal.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é propor um método para avaliação automatizada do vigor de sementes utilizando técnicas de processamento de imagens digitais que analisam as informações do comprimento das partes das plântulas.

1.2 Organização do Trabalho

O capítulo 1 introduz e fornece informações básicas relacionadas ao problema a ser tratado, evidenciando pesquisas importantes sobre o tema, assim como os objetivos deste trabalho.

A fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento dos experimentos deste trabalho é detalhada no capítulo 2, abrangendo temas como espaço de cores e descritores de forma.

Os materiais e métodos utilizados nesta abordagem são descritos no capítulo 3, mostrando o processo de aquisição das imagens, segmentação e extração das características.

Os resultados dos experimentos realizados são exibidos no capítulo 4.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas sobre o trabalho realizado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo introduzir conhecimentos utilizados neste trabalho, conhecimentos estes que compreendem os ramos de agricultura de precisão e de processamento de imagens digitais.

2.1 Testes de Vigor

Isely (1957) classificou os testes de vigor em diretos e indiretos. Os testes diretos são métodos que buscam simular condições de campo, sendo estas muitas vezes adversas, e os testes indiretos procuram avaliar características físicas, fisiológicas ou biológicas, que se relacionam indiretamente com o vigor das sementes. Esta classificação foi usada durante alguns anos, porém se mostrou inconsistente, pois alguns testes poderiam se encaixar nas duas categorias, como os testes baseados no crescimento das plântulas, que são realizados tanto em laboratórios quanto em condições de campo.

Assim em McDonald (1975) se propôs uma classificação mais completa e precisa, possibilitando a inclusão de novos métodos. Segundo a nova classificação, os testes de vigor se dividem em:

- Testes Físicos: são testes que avaliam aspectos morfológicos ou características físicas das sementes com relação ao vigor. Exemplos de testes físicos são os testes de tamanho das sementes, peso unitário de cada semente e testes de raios-X.
- Testes Fisiológicos: testes que procuram determinar atividades fisiológicas específicas, nas quais as manifestações dependem do vigor. Alguns testes fisiológicos são a classificação do vigor das plântulas, primeira contagem de germinação e velocidade de germinação das plântulas.
- Testes Bioquímicos: avaliam modificações bioquímicas associadas ao vigor. Os testes de tetrazólio e os testes de condutividade elétrica são exemplos desta categoria.
- Testes de Resistência: são testes que avaliam o desempenho das sementes sob condições extremas, como exposição a temperaturas altas ou baixas. Como exemplo de testes de resistência tem-se o teste de frio e o de envelhecimento acelerado.

Dentre os muitos testes de vigor de sementes, os comitês de vigor da ISTA e da AOSA consideram mais convenientes para a avaliação do vigor em sementes os testes de crescimento

de plântulas, envelhecimento acelerado, classificação do vigor das plântulas, teste de frio, teste de tetrazólio e condutividade elétrica.

Os testes de vigor baseados no desempenho das plântulas são realizados em campo ou em laboratório, sob condições controladas (NAKAGAWA, 1999). Os testes de laboratório são realizados nas mesmas condições dos testes de germinação, seguindo as Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 2009) e posteriormente, características da germinação ou das plântulas são avaliadas. São testes de baixo custo, rápidos, não necessitam de equipamentos especiais e mão de obra altamente especializada, por isso será o objeto deste estudo. Informações sobre alguns testes de vigor baseados no desempenho das plântulas realizados em campo são descritos por Oliveira et al. (2009).

Antes da realização dos testes de vigor baseados no desempenho das plântulas em laboratório, algumas regras devem ser definidas a fim de padronização dos testes, como o valor da temperatura empregada, umidade do substrato e se haverá ou não presença de luz, pois estes fatores podem causar alterações na germinação e no desempenho das plântulas. Após a definição das regras, é necessário utilizar equipamentos, métodos e materiais que garantam que as condições não sejam violadas.

Existem alguns fatores que complicam a utilização deste tipo de teste, descritos por Nakagawa (1999), dentre eles podemos destacar o tamanho das sementes, pois sementes pequenas germinam mais rápido e sementes grandes geram plântulas maiores, gerando problemas na comparação do vigor entre lotes; sementes que necessitam de tratamento químico, que podem prejudicar a avaliação de certas características; e a falta de valores de referência para resultados do teste, por isso é usado apenas o vigor relativo entre lotes ou amostras.

Alguns testes realizados em laboratório são listados abaixo:

- Teste de velocidade de germinação: teste baseado no princípio de que possuem maior velocidade de germinação são mais vigorosos. A partir do momento que surgem as primeiras plântulas normais, são realizadas avaliações diárias na mesma hora até o dia da última contagem, que é definido pelas Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Nakagawa (1999) e Oliveira et al. (2009) mostram equações usadas para o cálculo da velocidade de germinação. Quanto maior for o valor obtido das equações, maior será a velocidade de germinação, logo maior será o vigor.
- Teste de primeira contagem de germinação: Nos testes de germinação são realizadas duas contagens, onde na primeira as plântulas normais (germinaram mais rápido) são retiradas. O teste de primeira contagem de germinação se baseia no princípio de que o

lote que possuir a maior porcentagem de plântulas normais na primeira contagem é o mais vigoroso. Neste teste é necessário definir o tamanho de uma plântula normal.

- Teste de crescimento das plântulas: o crescimento das plântulas pode ser avaliado pelo comprimento das plântulas ou pelo peso da matéria seca do eixo embrionário da plântula. Ambos os métodos de avaliação medem características físicas da plântula e, desde que as condições e procedimentos para o teste sejam bem definidos, são mais fáceis de reproduzir. Para este estudo será considerado o teste de comprimento da plântula.

Apesar de muitas vezes as diferenças entre o vigor de plântulas serem visíveis, ainda existe a necessidade da utilização de valores numéricos para separar as plântulas vigorosas das que não são. Uma alternativa para obter esses valores numéricos é a avaliação do comprimento médio das plântulas normais, no qual quanto maior for o valor do comprimento médio, mais vigorosa é a amostra.

A avaliação do vigor pelo comprimento da plântula envolve a mensuração do comprimento da plântula normal ou de suas partes (radícula, hipocótilo, epicótilo ou plúmula), que surgem após o teste de germinação realizado sob condições controladas, para não causar nenhuma variação que possa influenciar no vigor. A Figura 1 mostra as estruturas presentes em uma plântula de soja com três dias de germinação.

Figura 1 - Plântula de soja com três dias de germinação.

Para a realização deste tipo de teste são utilizados os mesmos materiais usados em testes de germinação (papel toalha, papel de filtro, mata-borrão) e uma régua milimétrica para efetuar as medidas. Além disso, será necessário um germinador com controle preciso de temperatura e umidade. O teste pode ser realizado em rolos de papel ou sobre papel em

gerbox (caixa para germinação), porém, este trabalho será realizado com base no método que utiliza rolos de papel, pois as sementes de soja são grandes para se fazer o teste de germinação em caixa gerbox.

Os procedimentos para a avaliação pelo comprimento de plântula são descritos por Nakagawa (1999), mas em resumo, são colocadas no papel de 10 a 20 sementes devidamente espaçadas e posicionadas de modo que o crescimento da plântula seja da forma mais retilínea possível (são realizadas no mínimo quatro repetições por amostra), após isso, cada um dos papéis é enrolado e colocado em um saco plástico (para conservar a umidade) e colocadas no germinador, permanecendo lá por um período que depende da espécie de semente a ser analisada. Após este período as plântulas consideradas normais são medidas pelos analistas de sementes com uma régua milimétrica. Ao final, é feita uma média aritmética, somando-se os comprimentos obtidos de cada plântula normal e dividindo-se pelo número de plântulas normais. Obtém-se o comprimento médio realizando a média aritmética dos resultados de cada repetição.

Pode ser facilmente compreendido que além do período de germinação, o processo manual de medir o comprimento de cada plântula toma um período de tempo considerável.

Na sequência, será apresentado o referencial teórico que compreende a área computacional.

2.2 Equação para cálculo do índice de Vigor

Sako (2001) em seu trabalho descreve uma equação para calcular o índice de vigor de forma automatizada.

$$Vigor = P_C * Crescimento + P_U * Uniformidade \quad (1)$$

$$Crescimento = \min(P_H * T_H + P_R * T_R, 1000) \quad (2)$$

$$Uniformidade = \max(1000 - (P_{D_H} * D_H + P_{D_R} * D_R + D_{Total} + P_{D_{R/H}} * D_{R/H}) - P_{Mortas} * Mortas, 0) \quad (3)$$

Explicando os termos das equações anteriores (1, 2 e 3) T_H e T_R são respectivamente o comprimento do hipocótilo e o comprimento da radícula, D_H , D_R , D_{Total} e $D_{R/H}$ representam o desvio padrão do comprimento do hipocótilo, do comprimento da radícula, do

comprimento total e o desvio padrão da relação entre o comprimento da radícula e do hipocótilo e cada um dos P representa o peso dado a cada parâmetro, onde os pesos podem ser ajustados de modo a favorecer o crescimento ou a uniformidade. O índice de vigor é dado em função do crescimento e da uniformidade da distribuição do comprimento das plântulas do lote, cada um abrangendo valores que vão de 0 a 1000, assim o índice de vigor também é dado por valores de 0 a 1000. Para que amostras com sementes mortas não tenham um índice de vigor relativamente alto, as sementes mortas são penalizadas ($P_{Mortas} * Mortas$).

Outra forma para calcular a uniformidade é uma adaptação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (RODRIGUES et al, 2001), utilizada para calcular a uniformidade da distribuição de água em sistemas de irrigação. O cálculo do Coeficiente de Uniformidade é expresso na equação 4:

$$CUC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |T_i - \bar{T}|}{n \times \bar{T}} \quad (4)$$

Onde CUC é o coeficiente de uniformidade de Christiansen, T_i é o comprimento da plântula analisada, $\bar{T}$ é o comprimento médio do lote de plântulas e n é a quantidade de plântulas do lote.

2.3 Espaços de Cor

A segmentação em uma imagem digital desempenha um papel importante para o campo de processamento de imagens, pois a partir dela conseguimos separar objetos de interesse do restante da imagem. As cores apresentam características importantes que possibilitam a realização da segmentação da imagem.

As cores percebidas pelos seres humanos resultam da natureza da luz refletida pelos objetos, pois a luz visível é composta de uma banda de frequências estreita no espectro de energia eletromagnética. Um corpo que reflete a luz com certo balanço entre os comprimentos de onda visíveis aos seres humanos é percebido como branco, porém, se este corpo refletir apenas uma faixa limitada do espectro visível, este é visto com alguns tons de cores (GONZALEZ & WOODS, 2010).

A superfície da retina do olho humano é composta por receptores discretos de luz, chamados de cones e bastonetes. Cada olho possui um número aproximado de 6 a 7 milhões de cones, localizados principalmente na região central da retina e são sensíveis a cor.

Aproximadamente de 75 a 150 milhões de bastonetes, quantidade muito maior do que a de cones, estão distribuídos pela superfície da retina, sendo que estes não estão relacionados a visualização de cores, porém são sensíveis a níveis de luminosidade.

Os cones podem ser separados em três categorias de sensoramento, na qual correspondem aproximadamente ao vermelho, verde e azul. Da quantidade total de cones, 65% deles sensíveis aos comprimentos de onda caracterizados como vermelho, 33% são sensíveis aos de comprimentos de onda de cor verde e apenas 2% são sensíveis à cor azul, sendo estes últimos mais sensíveis.

Para se lidar de uma forma matemática com as cores visualizadas, devem-se utilizar sistemas que trabalham de forma semelhante com o modo de captação do olho humano, sistemas estes chamados de espaços de cor. Na sequência, serão descritos dois destes espaços de cor utilizados na metodologia deste trabalho.

2.3.1 Espaço RGB

O modelo de cores RGB trabalha com cores representadas pelas componentes R, G e B, que definem a intensidade das cores representadas que são, respectivamente, vermelho (Red), verde (Green) e azul (Blue), as mesmas cores que as células do olho humano, os cones, captam. O modelo RGB é chamado de modelo aditivo, pois a partir da soma das três componentes que representam as cores primárias do modelo são obtidas todas as cores conhecidas. A Figura 2 mostra representação do cubo RGB, onde as cores primárias estão nos cantos, assim como as cores secundárias (ciano, magenta e amarelo). Na origem do cubo está o preto e na diagonal existente entre este e o branco estão os níveis de cinza.

Figura 2 - Representação do cubo de cores RGB. Adaptado de (GONZALEZ & WOODS, 2010).

O espaço de cores sRGB é um espaço de cor baseado no modelo RGB, criado pela IBM e pela Microsoft, sendo o espaço de cor padrão das imagens digitais, logo, as componentes de cor do espaço RGB podem ser obtidas diretamente da imagem.

2.3.2 Espaço HSV

O espaço de cores HSV é baseado na percepção da cor pelos seres humanos, sendo representado em um cone (Figura 3).

Figura 3 – Representação cônica do espaço HSV (CHAVES-GONZÁLEZ et al., 2009).

Neste modelo, a cor é decomposta em três componentes: matiz (*Hue*), saturação (*Saturation*) e valor (*Value*). A componente matiz é a cor propriamente dita, distinguindo uma cor de outra, como por exemplo, diferencia o vermelho do azul. Os valores que a componente pode assumir variam de 0 a 360, valores dos ângulos ao redor do eixo vertical do cone. A saturação mostra a pureza da cor definida pela matiz, referindo-se a distância da cor para o seu nível de cinza, tendo seus valores representados pela distância radial em relação ao eixo central, assumindo valores compreendidos entre 0 e 1. Quanto menor for o valor da saturação, mais apagada será a cor, tendo como exemplo a cor rosa, que é a cor vermelha com baixo valor de saturação. A componente valor refere-se ao brilho da cor, ou seja, refere-se a intensidade da luminosidade presente na cor. Os valores do brilho estão no eixo vertical do cone, variando de 0 a 1 (CANDEIAS e SILVA, 2004).

Os valores das componentes H, S e V podem ser obtidos através das componentes do espaço de cor sRGB, utilizando as expressões (CHAVES-GONZÁLEZ et al., 2009).

$$H = \begin{cases} \text{Indefinido}, & \text{se } MAX = MIN \\ 60 \cdot \frac{G - B}{MAX - MIN}, & \text{se } MAX = R \text{ e } G \geq B \\ 60 \cdot \frac{G - B}{MAX - MIN} + 360, & \text{se } MAX = R \text{ e } G < B \\ 60 \cdot \frac{B - R}{MAX - MIN} + 120, & \text{se } MAX = G \\ 60 \cdot \frac{R - G}{MAX - MIN} + 240, & \text{se } MAX = B \end{cases} \quad (5)$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{se } MAX = 0 \\ 1 - \frac{MIN}{MAX}, & \text{se } MAX \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$V = MAX \quad (7)$$

Sendo que $R, G, B, S, V \in [0,1]$, $H \in [0,360]$

Sendo ainda que

$$MAX = MÁXIMO(R, G, B) \quad (8)$$

$$MIN = MÍNIMO(R, G, B) \quad (9)$$

2.4 Detectores de Cantos

A detecção de cantos é uma área muito importante para muitas aplicações dentro do escopo de processamento digital de imagens, como correlação entre imagens (reconhecimento de *pixels* homólogos entre múltiplas imagens) e mosaicamento de imagens (duas ou mais imagens menores que possuem áreas de sobreposições vizinhas são “amarradas”, formando uma imagem maior, com melhor resolução) (CHEN et al., 2009). As imagens binárias de plântulas possuem algumas regiões às quais o cotilédone se fundiu a raiz, havendo nestas regiões alguns pontos que podem ser úteis para separar estas duas partes.

2.4.1 Detector Harris

O detector de Harris (HARRIS e STEPHENS, 1988) é o detector de cantos mais utilizado na literatura, sendo uma melhoria do detector Moravec (DEY et al, 2012), pois considera deslocamentos de uma pequena janela centrada em um ponto da imagem em qualquer direção (a técnica de Moravec considera apenas deslocamentos em ângulos de 45°), além de reduzir o ruído da imagem pelo uso de uma janela gaussiana circular. O detector é baseado na função de auto-correlação local que mede as variações locais do sinal com correções de deslocamentos.

Ao se considerar um deslocamento (x, y) e um ponto, tem-se como função de auto-correlação local a equação 10 (DEY et al, 2012):

$$c(x, y) = \sum_w [I(x_i, y_i) - I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)]^2 \quad (10)$$

Na equação 10 tem-se $I(x_i, y_i)$ como sendo a função da imagem e (x_i, y_i) são os pontos na janela W com centro no ponto (x, y) . A partir da aproximação feita através da expansão de Taylor, tem-se a seguinte equação (11) para representar a imagem deslocada:

$$I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y) \approx \left[I(x_i, y_i) + \begin{bmatrix} I_x(x_i, y_i) & I_y(x_i, y_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \right] \quad (11)$$

Na equação anterior, temos $I_x(x_i, y_i)$ e $I_y(x_i, y_i)$ como, respectivamente, derivadas parciais em x e y . Considerando-se filtros do tipo $[-1, 0, 1]$ e $[-1, 0, 1]^T$, as derivadas parciais da imagem podem ser calculadas ao substituir-se a equação 11 na equação 10 (equação 12).

$$c(x, y) = \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_w (I_x(x_i, y_i))^2 & \sum_w I_x(x_i, y_i) I_y(x_i, y_i) \\ \sum_w I_x(x_i, y_i) I_y(x_i, y_i) & \sum_w (I_y(x_i, y_i))^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$c(x, y) = \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y \end{bmatrix} C(x, y) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (13)$$

Na equação 13, $C(x, y)$ é a matriz de auto-correlação que captura a estrutura de intensidade na vizinhança local.

2.4.2 Detector SUSAN

Outra técnica bastante comum para realizar a detecção de cantos é chamada de *Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus* (SUSAN) (SMITH & BRADY, 1997), que consiste na utilização de uma máscara circular que é comparada com cada *pixel* da imagem. Se os *pixels* que estão sob a máscara possuem brilho semelhante ao brilho do *pixel* localizado no núcleo da máscara, então, essa área da máscara pode ser considerada com o mesmo brilho do núcleo, sendo esta área chamada de USAN (*Univalued Segment Assimilating Nucleus*). A Figura 4 mostra um exemplo contendo quatro máscaras circulares em diferentes posições da imagem de um retângulo destacado do *background* da imagem.

Figura 4 – Quatro máscaras circulares em diferentes posições de um retângulo (SMITH & BRADY, 1997).

Os cantos, ou quinas, são detectados de acordo com a área do USAN, sendo este localizado nos casos semelhantes à posição a da Figura 4, no qual a área da imagem que está dentro da máscara é mínima.

A comparação de similaridade entre os *pixels* da máscara e do núcleo da mesma citada anteriormente é dada pela seguinte função (Equação 14):

$$c(r, r_0) = \exp \left\{ - \left[\frac{I(r) - I(r_0)}{t} \right]^6 \right\} \quad (14)$$

Sendo que r_0 é a coordenada do núcleo, r são as coordenadas dos outros pontos presentes na máscara, $c(r, r_0)$ é o resultado da comparação entre os *pixels*, $I(r)$ e $I(r_0)$ são os valores dos níveis de cinza para os pontos r e r_0 respectivamente; e t é o valor limiar entre a diferença nos níveis de cinza que determina a capacidade de ser tolerante a ruídos e o menor contraste que pode ser identificado pelo detector SUSAN. O tamanho da região do USAN é dado pela equação 15

$$n(r_0) = \sum_{r \in c(r_0)} c(r, r_0) \quad (15)$$

A resposta à detecção do canto é dada pela equação 16, que procura a menor região USAN.

$$R(r_0) = \begin{cases} g - n(r_0), & n(r) < g \\ 0, & n(r) \geq g \end{cases} \quad (16)$$

Na equação 16 temos a variável g que representa o *threshold* geométrico, que seria o nível agudo para um canto, sendo o menor dos agudos, reforçando assim a informação dos cantos presentes na imagem.

2.5 Morfologia Matemática

Uma vez que a imagem está devidamente segmentada e binarizada, é necessário extrair o comprimento das partes da plântula para calcular o índice de vigor. Para isso é necessário extrair o cotilédone da plântula e reduzir a área ocupada pela raiz de modo a

facilitar a realização da medida de seu comprimento. A técnica de morfologia matemática pode ser um modo de se alcançar estes objetivos.

Morfologia matemática é uma técnica para extração de componentes úteis da imagem baseada na teoria dos conjuntos, sendo que cada conjunto representa objetos existentes em uma imagem (GONZALEZ & WOODS, 2010). Em aplicações de morfologia matemática em imagens binárias busca-se na vizinhança de cada *pixel* da imagem uma configuração de pontos pretos e brancos (FACON, 1996).

O princípio básico da morfologia matemática consiste em extrair informações relacionadas à topologia e a geometria de um conjunto não conhecido presente em uma imagem, sendo que a morfologia permite o processamento de imagens com o intuito de segmentar, realçar, detectar bordas, analisar formas, esqueletizar e afinar, dentre outras aplicações. As operações de morfologia matemática se baseiam em um conjunto com tamanho e formas conhecidas, chamado de elemento estruturante. O elemento estruturante é comparado ao conjunto desconhecido existente na imagem por meio de uma transformação, permitindo assim a avaliação deste conjunto (FACON, 1996).

De forma mais simples, Facon (1996) diz que o formato e o tamanho do elemento estruturante, geralmente definidos em uma malha retangular, possibilitam verificar o modo como este está contido ou não dentro de uma imagem.

A morfologia matemática possui duas operações fundamentais, chamadas dilatação e erosão, que dão base para a construção de outros algoritmos morfológicos, como as operações de abertura e fechamento. Basicamente, a operação de dilatação é utilizada para preenchimento de buracos e aumento da região e a operação morfológica de erosão reduz a região e aumenta buracos. A seguir será descrito com um pouco mais de informação o método morfológico utilizado neste trabalho.

2.5.1 Transformação Hit-Miss

A transformação *Hit-Miss* é uma operação morfológica binária que pode ser utilizada para buscar por padrões desejados de *pixels* do primeiro plano ou do plano de fundo da imagem. Consiste em testar um conjunto de uma imagem a partir de um elemento estruturante e o seu conjunto complemento a partir de outro elemento estruturante (FACON, 1996).

Além da utilização descrita acima, a transformação morfológica *Hit-Miss* pode ser utilizada para a realização do afinamento em imagens binárias. O afinamento utilizando esta

transformação é realizado pelo casamento de padrões da imagem binária com um conjunto B de elementos estruturantes, representado a seguir:

$$\{B\} = \{B^1, B^2, B^3, \dots, B^n\} \quad (17)$$

O processo de afinamento consiste em afinar uma imagem A passando por ela o elemento estruturante B^1 . Ao término do processo, é realizado o mesmo processo utilizando a imagem resultante com o elemento estruturante B^2 e assim sucessivamente até que a imagem resultante seja afinada com B^n . O processo é repetido até que não ocorram mais alterações. A equação 18 representa o processo de afinamento pela transformada (GONZALEZ & WOODS, 2010).

$$A \otimes \{B\} = \left(\left(\dots \left((A \otimes B^1) \otimes B^2 \right) \dots \right) \otimes B^n \right) \quad (18)$$

A Figura 5 mostra um conjunto de elementos estruturantes geralmente utilizado para realizar o afinamento pela transformação *Hit-Miss*.

0	0	0	-1	0	0	1	-1	0	1	1	-1
-1	1	-1	1	1	0	1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	-1	1	-1	0	-1	0	0
1	1	1	-1	1	1	0	-1	1	0	0	-1
-1	1	-1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
0	0	0	0	0	-1	0	-1	1	-1	1	1

Figura 5 – Conjunto de elementos estruturantes usados no afinamento pela transformação Hit-Miss.

Um problema resultante do processo de afinamento pela transformação Hit-Miss é a formação de alguns segmentos de tamanho reduzido, semelhantes a “pés de galinha”, localizados nas extremidades. Uma técnica variante do processo de afinamento, chamada de *Pruning* (FACON, 1996), tem como objetivo remover os pontos extremos de uma imagem já

afinada, removendo as estruturas das extremidades. É possível utilizar um dos dois conjuntos de elementos estruturantes para a técnica de *pruning*, representados pelas figuras 6 e 7.

0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	0
0	1	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	1	0
-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	0	0	0	0
-1	-1	-1	0	-1	-1	0	0	-1	0	0	0
0	1	0	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1
0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1

Figura 6 - Conjunto 1 de elementos estruturantes para realização do *pruning*.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Figura 7 - Conjunto 2 de elementos estruturantes para realização do *pruning*.

A maior diferença entre o afinamento e o *pruning* pela transformação Hit-Miss se dá pelo fato do número de ciclos necessários para atingir os resultados ser limitado para o *pruning*, pois é possível que ocorra uma destruição parcial da imagem se o processo for contínuo (FACON, 1996); enquanto no afinamento o processo se estabiliza, não importando se o número de ciclos foi maior do que o necessário para se obter o resultado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos realizados para este trabalho, assim como os materiais utilizados, de modo a analisar o vigor de sementes e o percentual de germinação do lote de sementes.

Todas as etapas que constituem a metodologia ou o *software* desenvolvido, foram desenvolvidas na linguagem de programação C#, utilizando-se do ambiente de desenvolvimento Microsoft Visual Studio 2010¹ e das bibliotecas de visão computacional AForge.net² e EMGU CV³, sendo esta última um *wrapper* na linguagem C# para a conhecida biblioteca OpenCV⁴.

Lotes de semente foram submetidos ao processo de germinação de três dias no Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz” (ESALQ – USP), sob supervisão do Prof. Dr. Francisco Guilhien Gomes Junior, conforme definido pelas Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009). A cada lote germinado, surgem plântulas consideradas normais, anormais e algumas das sementes não germinam. Pesquisadores da ESALQ estabeleceram uma espécie de gabarito para cada plântula dos lotes, correlacionando a imagem de cada uma delas com sua respectiva classe (normal, anormal e semente não germinada). A Figura 8 mostra um exemplo de lote de sementes que gerou os três tipos de plântulas após a germinação.

Figura 8 – Exemplo de gabarito fornecido pela ESALQ.

¹ Disponível em: <http://www.microsoft.com/visualstudio/ptb/products/visual-studio-2010-express>

² Disponível em: <http://www.aforogenet.com/framework/downloads.html>

³ Disponível em: http://www.emgu.com/wiki/index.php/Main_Page

⁴ Disponível em: <http://opencv.org/>

A Figura 9 mostra um fluxograma no qual o método é dividido em etapas básicas, descritas detalhadamente nas seções deste capítulo. O método de aquisição da imagem é descrito na seção 3.1. A segmentação e a separação das plântulas em *blobs* (objetos binários) são detalhadas nas seções 3.2 e 3.3. Na seção 3.4 é apresentada a fase de extração das características usadas para o cálculo do índice de vigor. A seção 3.5 apresenta o método utilizado para calcular o índice de vigor.

Figura 9 – Divisão da metodologia.

3.1 Aquisição da Imagem

Para a captura de imagens das plântulas de soja foi usado um *scanner* de mesa HP Scanjet 200, de modo semelhante ao descrito na abordagem de Sako (2001), de modo a capturar as imagens inserindo o tecido com as plântulas germinadas. O scanner foi montado em um suporte projetado para garantir condições ideais de iluminação. Na parte superior do suporte fica a parte digitalizadora do *scanner*. Na base do suporte, são colocados os tecidos com as plântulas e assim que a “tampa” é fechada é possível capturar a imagem. As imagens são capturadas com 300 dpi de resolução e 500 de brilho. O *scanner* é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Scanner utilizado nesta abordagem.

Um dos problemas relacionados à aquisição da imagem foi à coloração do papel utilizado para a germinação das sementes. Alguns pesquisadores utilizam o papel para germinação de diversas colorações, porém na ESALQ é utilizado o papel com a coloração branca, sendo que esta cor não favorece a segmentação da imagem, uma vez que o contraste entre o *background* e os objetos de interesse fica comprometido. De modo a resolver este problema, analistas de semente da ESALQ tingiram o papel utilizado com extrato de amarantho, fazendo com que o papel atingisse uma coloração cor-de-rosa. Também foi testado um papel tingido com um corante azul, sendo este desenvolvido pelo departamento de química da ESALQ exclusivamente para esta finalidade.

3.2 Segmentação e Separação dos Blobs

Tendo posse da imagem do lote de sementes a ser analisado, o método proposto inicia-se utilizando um filtro gaussiano, tendo uma matriz 9x9 como *template*, para a remoção de ruídos da imagem. A cada etapa descrita, serão apresentadas imagens mostrando a evolução dos métodos.

Os primeiros testes foram realizados utilizando o espaço de cores sRGB, gerando uma imagem em escala de cinza para os canais R, G e B. Após análises, constatou-se que a imagem gerada pelo canal G foi a imagem na qual pôde-se encontrar um melhor contraste entre os níveis de cinza do *background* da imagem e os níveis de cinza das plântulas, conforme pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Imagens dos canais R (a), G (b) e B (c).

A imagem selecionada foi submetida à técnica de limiarização (*thresholding*) para atingir-se resultados como os apresentados na imagem representada pela Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de thresholding do canal G.

Assim como foi feito com o espaço de cores sRGB, foram criadas imagens em escala de cinza para os canais *Hue*, *Saturation* e *Value* do espaço HSV, sendo que o canal H apresentou uma imagem praticamente segmentada em relação às demais imagens geradas (Figura 13). Assim, realizando uma operação de *Thresholding*, obteve-se a imagem semelhante à visualizada na Figura 14.

Figura 13 – Imagens dos canais H (a), S (b) e V (c).

Figura 14 –Exemplo de thresholding do canal H.

Outro método testado com a finalidade de segmentar a imagem foi a subtração e adição entre matrizes obtidas pelos canais dos espaços RGB e HSV. O processo de subtração entre os canais dos dois modelos de cor é representado pelos diagramas da Figura 15, onde os círculos representam as matrizes extraídas dos canais e as setas, a operação de subtração. Assim, foram obtidas 30 novas imagens as quais foram analisadas de modo a identificar qual teria as melhores características para a segmentação e para a descrição de cada uma das plântulas do lote.

Figura 15 – Subtração entre canais RGB (a), subtração dos canais HSV (b), subtração dos canais RGB dos canais HSV (c) e subtração dos canais HSV dos canais RGB.

Após a análise das imagens, observou-se que ao subtrair a matriz obtida do canal S do HSV da matriz obtida pelo canal G do RGB houve a remoção completa de estruturas que não interessam para a análise das imagens, ou seja, o processo executa a remoção do fundo das imagens, porém, alguns detalhes das plântulas ficaram muito escuros, podendo levar a problemas na imagem binária, como no exemplo que pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Exemplo de subtração da imagem do canal S (espaço HSV) da imagem do canal G (espaço RGB).

Foram realizadas algumas operações com a imagem da Figura 15, de modo a realçar algumas características na imagem, como o formato das plântulas que serão úteis para a classificação das mesmas. Operações de soma e subtração foram realizadas com matrizes resultantes da subtração representada pela Figura 14, sendo que após testes, chegou-se na configuração representada pela equação 19, na qual as variáveis representam matrizes dos canais dos dois modelos de cor em questão, sendo uma amostra da imagem formada representada pela Figura 17.

$$Img_{segmentada} = (G - S) + (G - H) \quad (19)$$

Figura 17 – Imagem segmentada.

Como em algumas plântulas o cotilédone se juntou com a raiz lateralmente, foi aplicado o detector de bordas de Canny na imagem em escala de cinza, com o intuito de utilizá-las para realizar a separação da junção entre cotilédone e raiz. Para a realização da detecção de bordas, foram utilizados como valores de *threshold* até 20. A aplicação da detecção de bordas de Canny é apresenta resultados semelhantes ao da Figura 18.

Figura 18 – Bordas detectadas pelo detector de Canny.

Outro modo testado para abrir espaços em plântulas que desenvolveram a raiz próxima ao cotilédone após a germinação foi o desenvolvimento de um algoritmo que utiliza métodos de detecção de cantos para detectar pontos na imagem binária, principalmente nas regiões formadas entre o cotilédone e a raiz (Figura 19, destacadas em vermelho). Uma vez que os pontos são detectados (Figura 20), o algoritmo desenvolvido busca os pontos que estão nos extremos de cada região, traçando uma reta entre os mesmos, cortando a imagem binária e abrindo um espaço considerado ideal para separar a raiz do cotilédone.

Figura 19 - Regiões de interesse para detecção de cantos.

Foram testados dois detectores para o desenvolvimento deste trabalho, o detector de Harris (HARRIS e STEPHENS, 1988) e o detector SUSAN (SMITH e BRADY,1997), porém, alguns testes preliminares foram suficientes para descartar a utilização do detector Harris, pois este detecta uma quantidade excessiva de pontos (Figura 20), o que dificulta a identificação dos pontos para que a reta seja traçada. Já o detector SUSAN retornou uma quantidade menor de pontos, sendo alguns deles nas posições desejadas, como pode ser observado na Figura 21.

Figura 20 - Pontos detectados pelo detector de Harris.

Figura 21 - Pontos detectados pelo detector SUSAN.

Como pode ser observado na Figura 21, o método detectou pontos que estão fora da região de interesse, portanto, o algoritmo deve excluí-los do conjunto dos pontos úteis à construção das retas. Inicialmente, o algoritmo detecta a presença de “buracos” existentes na imagem binária considerando os *pixels* do *background* como pertencentes a objetos de interesse, sendo a presença de buracos uma condição para que o algoritmo seja executado. Depois de identificados, o algoritmo SUSAN é aplicado em cada imagem binária de plântula e cada ponto de *corner* detectado é armazenado em uma lista. Como cada “buraco” (*pixels* de *background*) é considerado um objeto de interesse, um laço é feito comparando-se os pontos da lista com pontos pertencentes a cada um deles. Se o ponto da lista pertence ao objeto, então ele é armazenado em uma outra lista de pontos que formarão as retas, excluindo assim os pontos da região externa da plântula localizados fora da região que deverá ser cortada pela reta, caso observado na figura 22.

Figura 22 – Ponto externo fora da região de interesse (círculo vermelho) e ponto externo dentro da região de interesse (círculo azul).

Para utilização do ponto de interesse externo, representado pelo círculo azul na Figura 22, foi utilizada a localização do último ponto encontrado na última região interna da plântula binária. A partir da observação de um conjunto de imagens binárias de plântulas, pôde-se notar um padrão nas plântulas que germinaram com a raiz encostada no cotilédono, no qual o ponto externo ideal se localiza abaixo do último “buraco” da plântula e esta região possui uma distância horizontal relativamente pequena do ponto externo, portanto, o ponto externo de interesse é o primeiro ponto com menor distância no eixo X em relação ao último ponto localizado dentro da última região interna da plântula, tendo a distância encontrada no eixo X prioridade em relação à distância encontrada entre estes pontos no eixo Y. A Figura 23 mostra um exemplo no qual o primeiro ponto externo encontrado se localiza mais próximo da região ao observar-se a distância no eixo Y, porém, muito distante do ponto extremo do último buraco no eixo X.

Figura 23 – Comparação entre distâncias (eixos X e Y) entre pontos externos e a região de interesse.

Após a seleção dos pontos, o algoritmo traça automaticamente um número de retas de acordo com o número de regiões internas presentes na imagem. A Figura 24 mostra um exemplo no qual apenas uma reta foi necessária para abrir o espaço entre cotilédone e raiz, já na Figura 25 temos o exemplo no qual existem duas regiões internas no objeto binário, em que são necessárias duas retas para abrir o espaço.

Figura 24 – Pontos detectados (a) e reta traçada (b).

Figura 25 – Aplicação em plântulas com múltiplas regiões. Pontos detectados (a) e retas traçadas (b).

3.3 Individualização dos *Blobs*

Após a obtenção da imagem binária é necessário rotular cada uma das plântulas presentes na imagem, para que as características sejam extraídas individualmente de cada uma. *Blobs* são estruturas que contêm objetos binários, neste caso, são as plântulas presentes na imagem binária. Para a rotulação e individualização dos *blobs* existentes na imagem foi executado um algoritmo baseado em componentes conectados, agrupando cada *pixel* branco presente na imagem de acordo com sua conectividade, neste caso, utilizando a vizinhança de 8 (GONZALES e WOODS, 2010). Segundo Costa e Jr (2002), uma componente conectada é representada por grupos de *pixel* que estão ligados entre si através de um caminho, no caso uma cadeia de *pixels* vizinhos. Depois de rotuladas, cada componente conectada gera uma nova imagem correspondendo a uma plântula e para cada imagem gerada são armazenadas as coordenadas correspondentes a sua localização na imagem original. A Figura 26 representa uma plântula devidamente separada da imagem original após a execução do algoritmo.

Figura 26 – Plântula extraída da imagem binária.

3.4 Extração das Características

Para possibilitar a avaliação do vigor e o percentual de germinação dos lotes de semente, é necessário extrair da imagem das plântulas o comprimento do hipocótilo e da radícula, além de extrair características que possam caracterizá-las unicamente como plântula normal, plântula anormal ou semente não germinada.

Para poder extrair o comprimento das partes da plântula úteis para avaliar o vigor do lote de sementes, foram testados 2 métodos diferentes, descritos a seguir.

O primeiro método utilizado para remover a área correspondente à semente foi uma tentativa de estimar a porcentagem da área total do *blob* equivalente ao cotilédone. Para isto, cada imagem binária das plântulas foi submetida a sucessivas erosões, uma vez que a raiz é mais fina do que a semente, terminando este processo quando a área branca presente na imagem atingisse um número de *pixels* menor do que 2000, tamanho este no qual algumas características, como o formato do cotilédone, ainda estão preservadas. Este valor (2000) foi eleito depois de um procedimento exaustivo de testes feitos em mais de 3000 imagens de plântulas.

Depois, a imagem resultante das erosões foi dilatada até que a área do objeto presente na imagem ficasse com 87% da área da imagem binária original, gerando uma nova imagem. Feito isto, foi realizada a operação lógica NAND utilizando a imagem resultante da dilatação e a imagem original, em uma imagem da plântula com o cotilédone removido.

Após a remoção do cotilédone da imagem binária, a porção contendo a raiz foi submetida ao processo de afinamento utilizando a transformada *Hit-or-Miss* com 25 iterações para obter o esqueleto da imagem. A cada iteração do afinamento, os contornos da imagem resultante são extraídos e estes foram somados, criando um mapa de distâncias (Figura 27). Depois de obter o esqueleto foi possível extrair o comprimento total da raiz, porém, buscou-se

encontrar o ponto de transição entre hipocótilo e raiz primária para poder encontrar o tamanho de cada um deles.

Plântulas de soja com três dias de germinação não possibilitam uma identificação precisa da região de transição, pois as duas estruturas estão unidas, mas é possível estimar visualmente que a transição está no local em que a raiz começa a ficar mais fina.

Foi criado um algoritmo que busca a cor mais próxima do vermelho no mapa de distâncias. As coordenadas das linhas (coordenadas X) da imagem onde houver ocorrência desta cor são armazenadas em uma lista. Depois, o ponto de transição é pintado na imagem do esqueleto com a cor vermelho utilizando a coordenada X localizada no centro da lista. Os *pixels* brancos do esqueleto que estão acima deste ponto foram considerados como hipocótilo e foram pintados com a cor azul, os *pixels* localizados abaixo do ponto de transição foram considerados como raiz primária e foram pintados com a cor vermelho.

Figura 27 – Mapa de distâncias.

O segundo método utilizado foi remover a área da semente após a aplicação da técnica de afinamento em cada *blob*. Cada uma das imagens binárias das plântulas foi submetida a 25 iterações do algoritmo de afinamento pela transformada *Hit-or-Miss*, fazendo com que a raiz fique mais fina e o cotilédone da imagem binária permaneça com uma porção maior de *pixels* brancos aglutinados, como pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 – Afinamento da imagem binária da plântula.

Após o afinamento, é possível isolar a porção correspondente ao cotilédone por meio da técnica de abertura. Assim aplicando-se a operação lógica XOR entre as imagens, é possível remover o cotilédone da imagem. Em algumas imagens ocorreu a formação de ramificações após o processo de afinamento pela transformada Hit-Miss, os chamados “pés de galinha”, que posteriormente foram removidos ou suavizados utilizando a técnica de *pruning* com o número de 8 iterações, número este estabelecido após a realização de testes exaustivos. O processo de remoção do cotilédone e aplicação de *pruning* é mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Processo de remoção do cotilédone. Imagem pós afinamento (a), imagem após remoção de cotilédone (b) e imagem após pruning (c).

Do mesmo modo que foi feito para a remoção do cotilédone de cada plântula, foi testada uma nova técnica para a separação das partes da plântula, gerando um mapa de distâncias com o auxílio da transformada de distância euclidiana ao invés da geração de um mapa por contornos do afinamento, como foi feito no primeiro teste. Para a geração do novo mapa de distâncias, foi gerada uma imagem de 15 cores, sendo que estas são definidas por intervalos iguais de distância da transformada. A primeira faixa de distância do novo mapa de distâncias possui valores que variam de zero ao valor resultante da divisão da maior distância computada pela transformada por 15. A segunda faixa possui distâncias que variam do limite da primeira faixa até o dobro de seu valor e assim sucessivamente. A Figura 30 mostra um exemplo do mapa de distâncias.

Figura 30 – Mapa de distâncias gerado por meio da Distância Euclidiana.

Desse modo, foi implementado um algoritmo que encontra as coordenadas das linhas da imagem nas quais existe o maior número de cores do mapa de distância e as armazena em uma lista. A última linha armazenada na lista é considerada como a linha na qual existe a separação das partes. A coordenada X desta linha é utilizada para encontrar o ponto de transição na imagem do afinamento e este é pintado de vermelho. Os *pixels* brancos do esqueleto que estão acima deste ponto foram considerados como hipocótilo e foram pintados com a cor azul, os *pixels* localizados abaixo do ponto de transição foram pintados com a cor vermelho e considerados como raiz primária, do mesmo modo que foi feito no primeiro teste.

3.5 Cálculo do Índice de Vigor

Os cálculos do índice de vigor do lote de sementes foram efetuados utilizando as equações descritas por Sako (2001), previamente citadas no capítulo 2. Também foi testada a substituição do cálculo da Uniformidade utilizada no sistema descrito por Sako pelo cálculo do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen adaptado. Como o índice de Vigor é dado em função do crescimento e da uniformidade do lote, e o valor de cada uma destas variáveis está no intervalo de 0 a 1000, foi necessário adequar à equação para que o coeficiente tenha valores neste intervalo e também acrescentar uma forma de penalizar a existência de sementes mortas, definida em conjunto com pesquisadores da ESALQ. A equação 20 apresenta as devidas adaptações, sendo ela agora chamada de equação de uniformidade de Lima.

$$UniformidadeLima = MAX \left(0, \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |T_i - \bar{T}|}{n \times \bar{T}} \right) \times 1000 - Penalização \right) \quad (20)$$

A *Penalização* inserida na equação é dada em função do número total de plântulas (n_{total}) e do número de sementes mortas ou não germinadas (n_{mortas}) presentes no lote analisado. O cálculo desta penalização é dado pela equação 21.

$$Penalização = n_{mortas} \times \left(\frac{50}{n_{total}} \right) \quad (21)$$

Neste capítulo foram apresentadas as técnicas testadas para alcançar os objetivos propostos. No próximo capítulo serão apresentados os resultados, assim como discussões sobre os mesmos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados descritos neste capítulo serão relacionados à forma de extração das características e ao cálculo do índice de vigor utilizando os dois modos propostos na seção 3.5 do Capítulo 3. Inicialmente, para efeito de demonstração, a imagem de um lote de sementes foi escolhida de um conjunto de 120 imagens de lotes e a partir desta serão apresentados e discutidos os resultados de acordo com cada teste de segmentação e extração de características, a saber:

- A. Segmentação utilizando o canal H do modelo HSV, remoção do cotilédone utilizando estimativa de área e utilização do mapa de distância para separação das partes;
- B. Segmentação utilizando o canal H do modelo HSV, remoção do cotilédone utilizando imagem pós-afinamento e utilização da transformada de distância euclidiana para separação das partes;
- C. Segmentação utilizando o canal H do modelo HSV, abertura de espaços na imagem binária com o auxílio da detecção de bordas, remoção do cotilédone utilizando imagem pós-afinamento e utilização da transformada de distância para separação das partes;
- D. Segmentação utilizando resultado de operações matemáticas em matrizes dos modelos de cores, abertura de espaços na imagem binária com o auxílio da detecção de bordas, remoção do cotilédone utilizando imagem pós-afinamento, redução da ramificação utilizando a técnica de *pruning* e utilização da transformada de distância para separação das partes;
- E. Segmentação utilizando resultado de operações matemáticas em matrizes dos modelos de cores, abertura de espaços na imagem binária com o auxílio da detecção de cantos, remoção do cotilédone utilizando imagem pós-afinamento, redução da ramificação utilizando a técnica de *pruning* e utilização da transformada de distância para separação das partes;

Os resultados para cada teste serão discutidos na sequência em que foram listados acima, por meio de figuras e tabelas. Os resultados obtidos a partir do teste A são ilustrados pela Figura 31, sendo as características relativas ao comprimento das partes e ao comprimento total da plântula, em *pixels*, mostradas na Tabela 1.

Figura 31 – Resultado do teste A: sobreposição dos esqueletos sobre a imagem original.
Hipocótilo em azul, raiz primária em vermelho.

Tabela 1 – Características para cálculo do índice de vigor de lote de sementes extraídas pelo teste A, em *pixels*.

Plântula	Hipocótilo (<i>pixels</i>)	Raiz Primária (<i>pixels</i>)	Comprimento Total (<i>pixels</i>)
1	297	694	991
2	215	848	1063
3	271	806	1077
4	312	543	855
5	170	764	934
6	0	0	0
7	25	585	610
8	386	286	672
9	281	222	503
10	65	75	140
11	334	329	663
12	223	363	586
13	176	505	681
14	262	101	363
15	0	0	0
16	0	0	0
17	179	469	648
18	114	394	508
19	0	0	0
20	264	150	414

Observando-se a Figura 31, nota-se que o método utilizado para remover o cotilédone das plântulas no teste A prejudicou a identificação de parte do hipocótilo em todas as plântulas, principalmente nos casos em que a raiz da plântula cresce justaposta ao cotilédone (Figura 32).

Figura 32 – Exemplo de cotilédone removido erroneamente devido à justaposição entre o mesmo e sua raiz.

Pode-se concluir também pela análise da imagem que algumas plântulas que mesmo desenvolvidas, tiveram a raiz totalmente removida pelo método de remoção do cotilédone, refletindo nos valores nulos encontrados na Tabela 1. Outra deficiência encontrada no teste, segundo pesquisadores da ESALQ, foi o ponto de transição entre hipocótilo e raiz primária marcado utilizando o auxílio do mapa de distâncias. A técnica utilizada fez com que o ponto de transição entre as partes ficasse em uma posição muito abaixo da qual seria considerada ideal, conforme pode ser visto na Figura 33.

Figura 33 – Local de transição das partes da plântula. (a) Resultado do método automático (Teste A). (b) Região aceita para a localização do ponto de transição.

Assim como feito para o teste **A**, os resultados do teste **B** serão expressos por meio de uma imagem (Figura 34), na qual é possível visualizar o resultado do método de remoção dos cotilédones, e uma tabela contendo o comprimento individual das partes de cada plântula, assim como o comprimento total (Tabela 2).

Figura 34 - Resultado do teste **B**: sobreposição dos esqueletos sobre a imagem original.
Hipocótilo em azul, raiz primária em vermelho.

Tabela 2 – Características para cálculo do índice de vigor de lote de sementes extraídas pelo teste **B**, em *pixels*.

Plântula	Hipocótilo (<i>pixels</i>)	Raiz Primária (<i>pixels</i>)	Comprimento Total (<i>pixels</i>)
1	359	463	822
2	797	1.071	1.868
3	205	446	651
4	321	815	1.136
5	213	542	755
6	102	0	102
7	184	458	642
8	381	1.066	1.447
9	392	628	1.020
10	187	445	632
11	325	373	698
12	232	819	1.051
13	58	620	678
14	276	453	729

Plântula	Hipocótilo (<i>pixels</i>)	Raiz Primária (<i>pixels</i>)	Comprimento Total (<i>pixels</i>)
15	187	241	428
16	272	98	370
17	379	517	896
18	171	549	720
19	66	102	168
20	269	494	763

No teste **B** é possível verificar a eficiência do novo método de remoção dos cotilédones em relação ao utilizado no teste **A**, pois todas as plântulas do lote desenvolveram raiz e de todas foi possível extrair o comprimento das mesmas, conforme a Tabela 2, diferente do que pode ser visto na Tabela 1. Ainda com relação à remoção dos cotilédones, é possível afirmar que do total de plântulas presentes na imagem da Figura 33, baseado na análise visual, 50% delas tiveram seu cotilédone removido corretamente, preservando todo o comprimento do hipocótilo. Nas plântulas restantes, a remoção incorreta do cotilédone foi ocasionada pelo fato das raízes terem crescido encostadas ao cotilédone, do mesmo modo visto na Figura 32, resultando em uma fusão de uma porção do hipocótilo com o cotilédone destas plântulas na imagem binária. Neste teste foi trocado o mapa de distâncias gerado pelo contorno de cada iteração do afinamento pelo mapa de distância criado pela transformada de distância euclidiana, o que fez com que em 70% das plântulas o ponto de transição identificado pelo método automático ficasse próximo da região considerada ideal, conforme pode ser visto na Figura 35.

Figura 35 – Local de transição das partes da plântula. (a) Resultado do método automático (Teste **B**). (b) Região aceita para a localização do ponto de transição.

O teste **B** apresentou resultados melhores que o teste **A** ao se tratar da metodologia de remoção do cotilédone, porém, ainda o problema relacionado com raízes que nascem juntas a este ainda dificulta a obtenção do comprimento total do hipocótilo. Assim, o teste **C** foi realizado basicamente com os mesmos procedimentos do teste **B**, porém, realizando uma operação lógica XOR entre a imagem binária e as bordas extraídas e da imagem em escala de cinza, seguida de uma operação de abertura por morfologia matemática. Os resultados para o teste **C** são mostrados através da Figura 36 e da Tabela 3.

Figura 36 – Resultado do teste **C**: sobreposição dos esqueletos sobre a imagem original. Hipocótilo em azul, raiz primária em vermelho.

Tabela 3 – Características para cálculo do índice de vigor de lote de sementes extraídas pelo teste **C**, em *pixels*.

Plântula	Hipocótilo (<i>pixels</i>)	Raiz Primária (<i>pixels</i>)	Comprimento Total (<i>pixels</i>)
1	604	592	1.196
2	2.152	337	2.489
3	629	1.092	1.721
4	1.043	566	1.609
5	972	961	1.933
6	157	12	169
7	624	581	1.205
8	1.176	879	2.055
9	923	62	985
10	356	1.175	1.531

Plântula	Hipocótilo (<i>pixels</i>)	Raiz Primária (<i>pixels</i>)	Comprimento Total (<i>pixels</i>)
11	1.139	401	1.540
12	631	706	1.337
13	345	1.111	1.456
14	1.155	832	1.987
15	369	210	579
16	586	178	764
17	727	761	1.488
18	648	781	1.429
19	103	116	219
20	1.305	518	1.823

Como pôde ser observado, a utilização das bordas, obtidas da imagem gerada pelo canal *Hue*, para abrir os espaços onde houve a fusão entre as duas partes da plântula contribuiu negativamente, tendo um resultado inferior ao do teste **B**. Pode-se observar que não houve melhoria na detecção da extensão do hipocótilo e também parte da extensão da raiz primária foi removida em 90% das plântulas. Outro fato evidente foi à grande quantidade de ramificações nos esqueletos gerados pelo teste **C**, fato este que fez com que o valor do comprimento de cada parte das plântulas na Tabela 3, principalmente o comprimento do hipocótilo, ficasse com valor maior do que extraído pelo teste **B**.

O teste **D** foi realizado com a imagem resultante da operação matemática entre as matrizes descrita no Capítulo 3 e com a detecção de bordas utilizada novamente para abertura de espaços onde a raiz se funde com o cotilédone. Os resultados da remoção do cotilédone deste teste demonstraram uma melhora significativa em relação aos resultados obtidos por meio do teste **B**.

A Figura 37 mostra os resultados do teste **D** para o mesmo lote de sementes utilizado nos outros testes e a partir da observação da imagem, nota-se que 75% das plântulas do lote tiveram o cotilédone removido corretamente, possibilitando a extração do comprimento de toda a extensão da raiz; e 75% das plântulas tiveram o ponto de transição entre as partes marcado dentro dos limites da região considerada ideal. Os valores do comprimento do hipocótilo, do comprimento da raiz primária e do comprimento total da plântula são exibidos na Tabela 4.

Em todos os testes ocorreu a formação de ramificações no esqueleto da plântula, ocasionando erro na mensuração do esqueleto, porém, no teste **D** foi utilizada a técnica de *pruning* para removê-las.

Figura 37 - Resultado do teste **D**: sobreposição dos esqueletos sobre a imagem original.
Hipocótilo em azul, raiz primária em vermelho.

Tabela 4 – Características para cálculo do índice de vigor de lote de sementes extraídas pelo teste **D**, em *pixels*.

Plântula	Hipocótilo (<i>pixels</i>)	Raiz Primária (<i>pixels</i>)	Comprimento Total (<i>pixels</i>)
1	363	438	801
2	534	1.005	1.539
3	174	458	632
4	344	882	1.166
5	184	534	718
6	0	0	0
7	323	471	794
8	319	1.045	1.364
9	324	708	1.032
10	205	455	660
11	361	344	705
12	440	859	1.299
13	47	757	804
14	286	449	735
15	233	142	375
16	304	148	452
17	220	665	885
18	124	584	708
19	56	74	130
20	233	511	744

Apesar de ter sido melhorada a detecção da extensão do hypocótilo no teste **D**, a técnica de detecção de contornos Canny para separar o cotilédone da raiz foi testada e comparada com a técnica que utiliza o detector de cantos SUSAN. Para verificar o desempenho de cada técnica, foram selecionadas 425 plântulas que se encontravam na situação em que a junção do cotilédone com a raiz formava uma espécie de “alça”, e estas submetidas aos dois métodos de separação. Cada imagem de plântula foi avaliada visualmente para verificar se o cotilédone foi separado da raiz corretamente. As figuras 38 e 39 representam alguns exemplos de acertos e erros para cada método.

Figura 38 – Exemplos de acerto para os dois métodos.

Figura 39 – Exemplos de erros para os dois métodos.

Ao final da análise, o método de abertura utilizando o detector Canny apresentou 64,94% de plântulas com o cotilédone separado corretamente da raiz, apresentando um desempenho considerado ruim por especialistas em sementes, além de ocasionar alguns defeitos na imagem binária das plântulas que podem ocasionar em um número muito grande de ramificações após o afinamento, como pôde ser observado na Figura 38. O método que utiliza o detector de cantos SUSAN apresentou 94,35% de plântulas com a separação feita corretamente, sendo eleita como a melhor opção a ser aplicada no sistema. Em seguida será mostrado o resultado do Teste E, que utiliza a técnica da detecção de cantos e *pruning* para remover as ramificações na aplicação final (Figura 40), o comprimento de cada plântula analisada e de suas estruturas é mostrado na Tabela 5.

Figura 40 – Resultado do teste E: sobreposição dos esqueletos sobre a imagem original.

Hipocótilo em azul, raiz primária em vermelho.

Tabela 5 – Características para cálculo do índice de vigor de lote de sementes extraídas pelo teste E, em *pixels*.

Plântula	Hipocótilo (<i>pixels</i>)	Raiz Primária (<i>pixels</i>)	Comprimento Total (<i>pixels</i>)
1	344	403	747
2	548	1.044	1.592
3	154	473	627
4	339	863	1202
5	133	572	705

Plântula	Hipocótilo (<i>pixels</i>)	Raiz Primária (<i>pixels</i>)	Comprimento Total (<i>pixels</i>)
6	0	0	0
7	299	499	798
8	326	1009	1335
9	272	700	972
10	193	411	604
11	328	356	684
12	357	899	1256
13	381	739	1120
14	480	433	923
15	201	133	334
16	159	136	295
17	280	631	911
18	114	573	687
19	70	71	141
20	211	519	730

O teste **E** apresentou 80% das plântulas com os cotilédones removidos corretamente, tendo 75% de plântulas com o ponto de separação entre cotilédone e raiz primária marcado dentro da região considerada ideal. A Figura 41 mostra uma comparação do resultado do método para abrir espaço entre cotilédone e raiz nos testes **D** e **E**, respectivamente. A tabela 6 mostra um resumo dos resultados dos testes realizados, considerando-se as características mais relevantes.

Figura 41 – Resultados do método de separação do cotilédone/raiz. (a) Teste **D** e (b) Teste **E**.

Tabela 6 – Resumo do resultado dos testes realizados.

Aspectos avaliados	Teste A	Teste B	Teste C	Teste D	Teste E
Cotilédones removidos corretamente	Insignificante	50%	Insignificante	75%	80%
Ponto de transição marcados corretamente	Insignificante	70%	Insignificante	75%	75%

Estes resultados demonstram que o teste E alcançou índices superiores a todos os anteriores e foi considerado como o melhor método para se avaliar o vigor de sementes em plântulas de soja, considerando apenas a análise da imagem que foi utilizada. Foram selecionados 120 lotes de sementes de soja, contendo 20 plântulas cada, sendo que 60 lotes tiveram imagens capturadas em papel de coloração cor-de-rosa e 60 lotes com coloração azul. As imagens que tinham o *background* de coloração cor-de-rosa obtiveram uma média de 88,47% de cotilédones corretamente separados da raiz, possibilitando a identificação da extensão da raiz por completo. Já nos testes com *background* de cor azul, a média de cotilédones separados da raiz de modo correto subiu para 91%, com valor-p calculado pelo teste T de Student sendo de 4,78% entre as amostras (APENDICE C), rejeitando-se assim a hipótese da utilização de ser indiferente a cor do papel usado no experimento, mostrando que o papel azul teve resultados melhores. As Figuras 42 e 43 mostram exemplos de lote em que 100% das plântulas tiveram uma separação correta para os papéis cor-de-rosa e azul, respectivamente. Já as Figuras 44 e 45 mostram os piores resultados para as duas colorações de papel.

Figura 42 – Lote com 100% de cotilédones separados corretamente (Cor-de-rosa).

Figura 43 – Lote com 100% de cotilédones separados corretamente (Azul).

Figura 44 – Lote com 75% de cotilédones separados corretamente (Cor-de-Rosa).

Figura 45 – Lote com 80% de cotilédones separados corretamente (Azul).

Um dos motivos para a ocorrência do aumento da média de acertos foi o fato de que o corante do papel cor-de-rosa foi absorvido pelas plântulas durante o período de germinação, fazendo com que as mesmas ficassem tingidas com a cor do papel, sendo assim, durante a aplicação da técnica de segmentação da imagem, as estruturas da plântula tingidas também foram consideradas como parte do *background*. Os apêndices A e B apresentam em forma de tabela a porcentagem individual de cotilédones separados corretamente por lote para os papéis cor-de-rosa e azul, respectivamente.

Após definida a melhor técnica para remoção de cotilédones das plântulas, foram avaliados os métodos para quantificação do vigor de sementes. O primeiro método testado foi o cálculo do índice de vigor descrito por Sako (2001), sendo as suas equações componentes mostradas na seção 2.2. Os pesos utilizados em cada variável das equações foram definidos por analistas de sementes do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ e são mostrados na Figura 46.

Figura 46 – Pesos utilizados para o cálculo do índice de vigor.

Após efetuar os cálculos, verificou-se que o valor da uniformidade do comprimento das plântulas do lote estava incorreto, uma vez que em lotes contendo plântulas visivelmente com tamanho praticamente uniforme apresentam valores de uniformidade considerados medianos ou baixos. Como consequência, o valor do índice de vigor calculado não reflete o índice de vigor real do lote. Os valores obtidos pelas equações de Sako, utilizando como base uma imagem de plântulas com alta uniformidade e alto vigor (Figura 47), podem ser vistos na Tabela 6.

Figura 47 – Lote de alta uniformidade e vigoroso.

Tabela 7 – Resultados do cálculo da Uniformidade, do Crescimento e do índice de Vigor de um lote de sementes pelas equações de Sako.

Uniformidade	294
Crescimento	776
Índice de Vigor	631

A equação do cálculo da uniformidade apresentou resultados incorretos, classificando incorretamente um lote visivelmente vigoroso e com uma distribuição de comprimentos altamente uniforme com um índice de vigor considerado mediano. A equação utilizada foi substituída pela equação de uniformidade de Lima, mantendo as mesmas equações para calcular o crescimento e o índice de vigor, sendo os pesos das variáveis das duas equações os mesmos da Figura 46. Um detalhe a ser ressaltado é o fato da equação de Christiansen adaptada não necessitar da interferência humana para a escolha dos pesos. Os resultados dos cálculos para cada equação estão na Tabela 7, sendo o resultado do processamento do *software* desenvolvido representado na Figura 48.

Tabela 8 – Resultados do cálculo da Uniformidade de Lima, do Crescimento e do índice de Vigor de um lote de sementes pelas equações de Sako.

Uniformidade de Lima	854
Crescimento	783
Índice de Vigor	804

Figura 48 – Resultado do processamento do *software* com lote da Figura 47.

Também foi escolhida uma imagem de um lote com o *background* de cor azul (Figura 49), previamente classificado como possuindo alto índice de crescimento e uniformidade, para

ilustrar os resultados do processamento do *software*, utilizando as técnicas do Teste **E**, que são a abertura de espaços na imagem binária com o auxílio da detecção de cantos, remoção do cotilédono utilizando imagem pós-afinamento, redução da ramificação utilizando a técnica de *pruning* e utilização da transformada de distância para separação das partes. A Tabela 8 mostra o resultado dos cálculos para cada equação e a Figura 50 mostra o resultado do processamento.

Figura 49 – Lote de alta uniformidade e crescimento.

Tabela 9 – Resultados do cálculo da Uniformidade de Lima, do Crescimento e do índice de Vigor de um lote de sementes pelas equações de Sako em papel Azul.

Uniformidade de Lima	828
Crescimento	922
Índice de Vigor	894

Figura 50 – Resultado do processamento do *software* com lote da Figura 49.

A equação de uniformidade adaptada para este trabalho gerou resultados mais precisos ao se comparar o resultado do lote analisado com resultados previamente obtidos por analistas de semente, caracterizando o lote como vigoroso e refletindo a alta uniformidade da distribuição do comprimento de cada plântula sem necessitar que um analista tenha que atribuir pesos à variável uniformidade, diminuindo a subjetividade do método de Sako e mostrando assim que a equação de uniformidade de Lima tem maior potencial para descrever a uniformidade de um lote de sementes do que a equação proposta por Sako em seu trabalho.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados métodos para automatizar a análise do vigor de sementes baseando-se no desenvolvimento das partes das plântulas. Os testes realizados demonstraram que o melhor método para realizar a extração das características usadas para avaliar o vigor foi aquele baseado na segmentação de uma imagem gerada por operações matemáticas entre as matrizes dos canais dos modelos RGB e HSV, e na utilização do detector de cantos SUSAN para abrir espaços em plântulas que germinaram com raiz justaposta ao cotilédone, apresentando uma média de 91% dos cotilédones removidos corretamente na análise de 60 lotes de sementes germinados em papel azul, permitindo assim uma melhor descrição do comprimento das partes da plântula, sobretudo do hipocótilo. Também é possível concluir que a substituição da equação da uniformidade de Sako pela equação de uniformidade de Lima interferiu positivamente no cálculo do índice de vigor e eliminou parte da subjetividade humana, pois não necessita de pesos associados às variáveis necessárias para efetuar o cálculo.

Outro ponto a ser destacado é a redução de ramificações proporcionada pelo método que utiliza o detector SUSAN, que separa o cotilédone da raiz em 94,35% dos casos; e quando surgem ramificações, estas são facilmente suavizadas pela técnica de *pruning* da transformada *Hit-Miss*.

Atualmente o *software* resultante deste trabalho de pesquisa se encontra em fase de validação junto aos usuários na ESALQ e estes têm dado retorno positivo sobre o desempenho do mesmo.

6. TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, pretende-se estender o presente método para aplicação da avaliação do vigor de sementes em culturas as quais geram plântulas com morfologia semelhante a da plântula de soja e desenvolver um método invariante a rotação para abrir espaços em plântulas que tiveram a raiz crescida junto ao cotilédone.

TRABALHOS PUBLICADOS

Os trabalhos publicados em mídias e eventos científicos que são frutos desta pesquisa são:

- Resumos publicados em anais de congressos:
 1. LIMA, D. C. ; JORGE, L. A. C. ; RODRIGUES, E. L. L. ; GOMES JUNIOR, F. G. . Software para avaliação de vigor em sementes por processamento de imagens digitais. In: IV Jornada Científica Embrapa São Carlos, 2012, São Carlos-SP. Anais da IV Jornada Científica Embrapa São Carlos, 2012.

- Trabalhos completos publicados em anais de congressos:
 1. LIMA, D. C. ; RODRIGUES, E. L. L. ; JORGE, L. A. C. . Application of Image Processing Techniques to Automate the Seed Vigor Assessment Process in Soybean Seedlings. In: Workshop de Visão Computacional, 2013, Rio de Janeiro-RJ. Anais IX WVC 2013, 2013.
 2. LIMA, D. C. ; RODRIGUES, E. L. L. ; JORGE, L. A. C. . A New Approach to Automate the Seed Vigor Analysis on Soybean Seedlings Using Digital Images. In: Workshop de Visão Computacional, 2014, Uberlândia-MG. Anais X WVC 2014, 2014, p. 157-161.
 3. LIMA, D. C.; JORGE, L. A. C.; RODRIGUES, E. L. L.; GOMES JUNIOR, F. G. Sistema de Análise Automatizada do Vigor de Sementes. In: Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária – SIAGRO, 2014, São Carlos-SP, SIAGRO – Ciência, Inovação e Mercado, 2014, v.1, p. 45-48.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília. 2009. 395p.
- CANDEIAS, A. L. B.; SILVA, E. A. Extração de Estradas de uma imagem ETM+ Landsat usando Morfologia Matemática. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário (COBRAC), 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, UFSC, 2004. Artigos, 8p.
- CHAVES-GONZÁLEZ, J. M. et al. Detecting skin in face recognition systems: A colour spaces study. **Digital Signal Processing**, 23 out. 2009. 806-823.
- CHEN, J.; ZOU, L.; ZHANG J.; DOU, L. The Comparison and Application of Corner Detection Algorithms. **Journal of Multimedia**, v.4, p.435-441, no. 6, 2009.
- CONRAD, R. Method and apparatus for assessing the quality of a seed lot. **Ball Horticultural Company**. 1997 (Patente US5659623).
- COSTA, L.; JR, R. C. **Shape analysis and classification: theory and practice**. [S.l.]: CRC Press, 2002.
- DEY, N; NANDI, P; BARMAN, N; DAS, D; CHAKRABORTY, S. A comparative study between Moravec and Harris Corner Detection of noisy images using adaptative Wavelet thresholding technique. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 2, p. 599-606, 2012.
- FACON, J. **Morfologia Matemática: Teoria e Exemplos**. Curitiba: Editora Universitária Champagnat da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 1996.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens**. 3ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- HARRIS, C; STEPHENS, M. A combined corner and edge detector. **4th Alvey Vision Conference**, p. 147-151, 1988.
- HOFFMASTER, A. L.; FUJIMURA, M. B.; MCDONALD, M. B.; BENNETT, M. A. **An Automated System for Vigor Testing Three-Day-Old Soybean Seedlings**. The Ohio State University. 2003.

HOWARTH, M. S.; STANWOOD, P. C. Measurement of Seedling Growth Rate by Machine Vision. **Transactions of American Society of Agricultural Engineering**. v.36, n.3, p.959-963, 1993.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção agrícola**. Disponível em:

<ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/lspa_201501.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2015.

ISELY, D. Vigor Tests. **Proceedings of the Association of Seed Analysts** 47, p.176-182, 1957.

MARCOS FILHO, J. Testes de vigor: importância e utilização. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA-NETO, J.B. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. p.1.1-1.21.

MARCOS FILHO, J.; KIKUTI, A. L. P.; LIMA, L. P. Métodos para Avaliação do Vigor de Sementes de Soja, incluindo a Análise Computadorizada de Imagens. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 1, p. 102-112, 2009.

MARTINS C. C.; CARVALHO, N. M. Fontes de Deterioração na Produção de Soja e Respectivas Anormalidades nas Plântulas. **Revista Brasileira de Sementes**, vol. 16, n. 2, p. 168-182, 1994.

MCDONALD, M. B. A review and evaluation of seed vigor tests. **Proceedings of Association of Official Seed Analysts** 65, p. 109-139, 1975.

MCNERTNEY, D. C. **System and method for measure seedlot vigor**. Paradigm Research Corporation. 1999 (Patente US5864984).

MCCORMAC, A. C.; KEEFE, P. D.; DRAPER, S. R. Automated vigour testing of field vegetables using image analysis. **SeedSci. & Technol**, p.103-112. 1990.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho da plântula. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA-NETO, J.B. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. p.2:1- 2:21.

NOVEMBRE, A. D. L. C. **Avaliação da Qualidade em Sementes**. 2001. Disponível em: <<http://www.seednews.inf.br/portugues/seed53/artigocapa53.shtml>>. Acesso em: 27 de julho12.

OLIVEIRA, A. C. S.; MARTINS, G. N.; SILVA, R. F.; VIEIRA, H. D. Testes de Vigor em Sementes Baseados no Desempenho das Plântulas. **Inter Science Place**, ano 2, n. 4. 2009.

RODRIGUES, T. R. I.; BATISTA, H. S.; CARVALHO, J. M.; GONÇALVES, A. O.; MATSURA, E. E. Uniformidade de distribuição de água em pivô central, com a utilização da técnica TDR na superfície e no interior do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 35, nº 2, 2001. p. 187-191.

SAKO, Y. **Systems for Seed Vigor Assessment and Seed Classification**. Ohio State University. 2000.

SAKO, Y.; MCDONALD, M.B.; FUJIMURA, K.; EVANS, A.F.; BENNETT, M.A. **A system for automated vigor assessment**. Ohio State University, 2001.

SILVA, C. B.; LOPES, M. M.; MARCOS FILHO, J.; VIEIRA, R. D. Automated System of Seedling Image Analysis (SVIS) and Electrical Conductivity to Asses Sun Hemp Seed Vigor. **Revista Brasileira de Sementes**, vol. 34, nº 1, 2012. p.055-060.

SMITH, S. M.; BRADY, J. M. SUSAN – A New Approach to Low Level Image Processing. **International Journal of Computer Vision**. vol. 23, 1997, p. 45-78.

APÊNDICE A

Germinação em papel cor-de-rosa, janeiro de 2014

Lote	Cotilédones removidos corretamente
L1-A	75%
L1-B	75%
L1-C	90%
L1-D	90%
L1-E	Lote defeituoso, retirado da contagem
L2-A	80%
L2-B	90%
L2-C	100%
L2-D	90%
L2-E	100%
L3-A	85%
L3-B	90%
L3-C	90%
L3-D	100%
L3-E	95%
L4-A	90%
L4-B	100%
L4-C	90%
L4-D	85%
L4-E	100%
L5-A	100%
L5-B	80%
L5-C	90%
L5-D	90%
L5-E	90%
L6-A	95%
L6-B	95%
L6-C	85%
L6-D	90%
L6-E	100%
L7-A	90%
L7-B	90%
L7-C	94,70%
L7-D	80%
L7-E	100%
L8-A	95%
L8-B	85%
L8-C	70%
L8-D	75%

Lote	Cotilédones removidos corretamente
L8-E	90%
L9-A	85%
L9-B	95%
L9-C	90%
L9-D	80%
L9-E	95%
L10-A	80%
L10-B	95%
L10-C	80%
L10-D	80%
L10-E	100%
L11-A	80%
L11-B	80%
L11-C	85%
L11-D	70%
L11-E	90%
L12-A	90%
L12-B	90%
L12-C	85%
L12-D	85%
L12-E	85%
Média	88,47%

APÊNDICE B

Germinação em papel azul, março de 2014

Lote	Cotilédones removidos corretamente
L1-A	90%
L1-B	90%
L1-C	90%
L1-D	100%
L1-E	90%
L2-A	90%
L2-B	100%
L2-C	95%
L2-D	90%
L2-E	90%
L3-A	90%
L3-B	85%
L3-C	100%
L3-D	95%
L3-E	85%
L4-A	100%
L4-B	95%
L4-C	95%
L4-D	90%
L4-E	90%
L5-A	90%
L5-B	90%
L5-C	90%
L5-D	95%
L5-E	90%
L6-A	85%
L6-B	95%
L6-C	90%
L6-D	95%
L6-E	100%
L7-A	90%
L7-B	95%
L7-C	95%
L7-D	95%
L7-E	85%
L8-A	90%
L8-B	80%
L8-C	85%
L8-D	85%

Lote	Cotilédones removidos corretamente
L8-E	95%
L9-A	95%
L9-B	100%
L9-C	85%
L9-D	70%
L9-E	90%
L10-A	90%
L10-B	100%
L10-C	80%
L10-D	90%
L10-E	90%
L11-A	85%
L11-B	95%
L11-C	95%
L11-D	95%
L11-E	95,24%
L12-A	80%
L12-B	95%
L12-C	85%
L12-D	90%
L12-E	90%
Média	91%

APÊNDICE C

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes.

	<i>Lotes em papel Cor-de-rosa</i>	<i>Lotes em papel Azul</i>
Média	0,884694915	0,91004
Variância	0,006136009	0,003376232
Observações	59	60
Hipótese da diferença de média	0	
gl	107	
Stat t	-2,002012176	
P(T<=t) uni-caudal	0,023906864	
t crítico uni-caudal	1,659219312	
P(T<=t) bi-caudal	0,047813728	
t crítico bi-caudal	1,98238337	