

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
MESTRADO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

MARCOS ROBERTO DE RAMOS

USO DO SENSOR KINECT® PARA MEDIR A REGULARIDADE NA DISTRIBUIÇÃO
DE FERTILIZANTES SÓLIDOS

PONTA GOSSA
2012

MARCOS ROBERTO DE RAMOS

USO DO SENSOR KINECT[®] PARA MEDIR A REGULARIDADE NA DISTRIBUIÇÃO
DE FERTILIZANTES SÓLIDOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Computação Aplicada, curso de Mestrado em
Computação Aplicada da Universidade Estadual de
Ponta Grossa, como requisito parcial para obtenção do
título de Mestre em Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

PONTA GROSSA

2012

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor Tratamento da Informação Belém/UEPG

R175u Ramos, Marcos Roberto de
 Uso do sensor kinect® para medir a regularidade na distribuição
 de fertilizantes sólidos / Marcos Roberto de Ramos. Ponta Grossa,
 2012.
 87 f.

 Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada), Universidade
 Estadual de Ponta Grossa.
 Orientador. Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires.

 1. Kinect. 2. Calibração. 3. Fertilizantes. 4. Infravermelho. 5.
 Ferisystem. I. Caires, Eduardo Fávero. II. Universidade Estadual de
 Ponta Grossa. Mestrado em Computação Aplicada. III. T.

CDD: 006.7

TERMO DE APROVAÇÃO

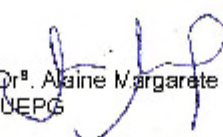
MARCOS ROBERTO DE RAMOS

**"USO DO SENSOR KINECT PARA MEDIR A REGULARIDADE NA
DISTRIBUIÇÃO DE FERTILIZANTES SÓLIDOS"**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa pela seguinte banca examinadora:

Orientador:


Dr. Eduardo Fávero Caires
UEPG


Dr. Elaine Margarete Guimarães
UEPG


Dr. Emerson Fcy
UNIOESTE

Ponta Grossa, 20 de dezembro de 2012.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a minha esposa Christiani por seu amor, apoio, sacrifício, paciência e compreensão. Tudo isso foi fundamental a minha dedicação a este trabalho e para superar os momentos mais difíceis.

Aos meus filhos Gustavo, Vinicius e João, que também são a razão da minha vida.

Um especial agradecimento ao meu amigo Wagner Chueiri, portador de muitas ideias e que me inspirou a este trabalho. Ajudou-me incontáveis vezes em nossas conversas, com empréstimo de equipamentos, amostras e sempre sem medir esforços.

Ao meu orientador Professor Eduardo, que se dispôs a me ajudar nesse caminho com muita paciência e confiança, compreendendo minhas dificuldades e limitações.

Aos meus colegas e professores do mestrado, que compartilharam de inúmeros momentos de dificuldade e me ajudaram muito durante este curso.

Ao Professor José Carlos e ao colegiado do curso que aceitaram meu pedido de prorrogação para a conclusão deste trabalho, e a CAPES pela bolsa de estudos que me ajudou muito neste período de dedicação.

Meu muito obrigado a todos!

RESUMO

Com o advento da visão computacional, pesquisadores vêm investigando métodos de captura de imagens 3D de objetos e a utilização destas informações em diversas áreas como medicina, arquitetura, educação, entre outras. O lançamento do sensor Kinect[®] Xbox, em novembro de 2010, como um acessório para detectar o movimento do jogador, chamou a atenção não só pelo baixo custo, mas também por disponibilizar informações sem criptografia, permitindo seu uso para outras tarefas além dos videogames. Neste trabalho foi explorada a capacidade do sensor em obter distâncias de profundidade por meio da sua câmera de infravermelho, e aplicá-las no estudo de um problema na área agrônômica relacionado com a regularidade na distribuição de fertilizantes minerais. Isso porque a irregularidade na distribuição dos fertilizantes pode causar danos importantes às culturas, tanto pelo excesso como pela falta de nutrientes, e levar a perdas econômicas e danos ambientais pelo excesso de nutrientes aplicados. Esses problemas estão relacionados a diversos fatores, entre eles as regulagens de equipamentos de distribuição ou mesmo a qualidade dos fertilizantes. Para alcançar o objetivo proposto, realizou-se um estudo minucioso sobre o funcionamento do sensor e testes da precisão dos cálculos e medidas. Os resultados revelaram acerto de até 99,78% na detecção da área e volume ocupado pelos materiais testados, com variações em décimos de milímetros. Um sistema computacional foi desenvolvido para obter a massa dos fertilizantes, calculando seu volume por meio das informações do sensor, conhecendo-se a densidade de cada material. Nos experimentos de validação com fertilizantes, o sistema alcançou acerto de até 98,26%, com variações em décimos de gramas entre o material estimado pelo sistema e a massa real medida por balança de precisão. O sistema foi testado em medições da massa de fertilizantes em uma esteira em movimento, simulando a aplicação de uma dosagem, obtendo acerto acima de 98% entre a quantidade estimada e a quantidade real aplicada. Concluiu-se que a utilização do sensor Kinect[®] é viável para medir a regularidade na distribuição de fertilizantes minerais sólidos, aplicando as metodologias e técnicas experimentadas nesse estudo.

Palavras-chave: Kinect, calibração, fertilizantes, infravermelho, fertisystem.

ABSTRACT

With the advent of computer vision, researchers have been investigating methods of capturing images of 3D objects and use this information in various fields such as medicine, architecture, education, among others. The launch of Xbox Kinect™ sensor in November 2010 as an accessory to detect player movement, drew attention not only for its low cost, but also by providing information unencrypted, allowing their use for other tasks beyond videogames. This study explored the ability of the sensor to obtain distances of depth through its infrared camera and apply it to solving a problem in agronomy related to regularity in the distribution of fertilizers. It is known that irregularity in the distribution of fertilizers can cause serious problems to the crops such as excess or lack of nutrients, and lead to economic losses and environmental damage by the excess of nutrient applied. These problems are related to several factors, including the adjustments of distribution equipment or even the quality of fertilizers. To achieve the proposed goal, we developed a detailed study on the functioning of the sensor and test the accuracy of the calculations and measurements. Results showed 99.78% accuracy up to the detection area and volume occupied by the materials tested, with variations in tenths of a millimeter. A computer system was designed to obtain the fertilizer mass, calculating its volume using the sensor information knowing the density of each material. In validation experiments with fertilizers system reached up to 98.26% of accuracy with variations in tenths of grams of material estimated by the system and the actual mass measured by a precision balance. The system was tested on measurements of the mass of fertilizer on a belt in motion, simulating the application of a fertilizer rate. A hit above 98% from the estimated amount and the actual amount applied was obtained. The results suggest that it is feasible the use of Kinect™ sensor for measuring the regularity in fertilizers distribution by using the methods and techniques experimented in this study.

Keywords: Kinect, calibration, fertilizers, infrared, fertisystem.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Desenvolvimento irregular de plantas pelo efeito da má distribuição de fertilizantes.	17
Figura 2	- Coleta de amostras de aplicação transversal de fertilizantes.....	18
Figura 3	- Coleta de amostras com uma aplicação longitudinal de fertilizantes.....	19
Figura 4	- Segregação física do fertilizante mineral em uma mistura de grânulos.	20
Figura 5	- Sensor Microsoft Kinect®	21
Figura 6	- Arquitetura do sensor Kinect®	23
Figura 7	- Criação da imagem de profundidade.....	24
Figura 8	- Arquitetura de comunicação do Kinect®	25
Figura 9	- Padrão de manchas projetadas para medir a profundidade.	26
Figura 10	- Representação esquemática da relação profundidade-disparidade	26
Figura 11	- Distância Real x Kinect®	31
Figura 12	- Imagem IR da nuvem de pontos projetada pelo Kinect®	32
Figura 13	- Funcionamento da câmera pinhole.....	35
Figura 14	- Modelo de projeção da câmera.....	35
Figura 15	- Transformação das coordenadas do mundo para coordenadas da câmera	37
Figura 16	- Imagem IR (sup. Esquerdo) e RGB (sup. Direito);.....	42
Figura 17	- Imagem Colorida (esquerda) e IR (direita)	44
Figura 18	- Detecção dos pontos do tabuleiro de xadrez.	44
Figura 19	- Referenciais da área de trabalho.....	46
Figura 20	- Ciclo e procedimentos do sistema.....	49
Figura 21	- Imagem IR criada pelo histograma das distâncias	50
Figura 22	- Imagem padrão RGB.....	50
Figura 23	- Imagem IR com erosões	51
Figura 24	- Imagem IR com quadro de captura reduzido	52
Figura 25	- Distância do pixel em relação ao centro focal.....	54
Figura 26	- Padrão de cores HSV.....	57
Figura 27	- Imagens da captura - 1ª: plano de referência; 2ª: objeto iluminado; 3ª: sem iluminação.....	59
Figura 28	- Medição de 3 cubos.....	59

Figura 29	- Medição de 12 cubos	60
Figura 30	- Imagem da amostra de superfosfato triplo (SFT).....	61
Figura 31	- Imagem da amostra de cloreto de potássio (KCl).	61
Figura 32	- Imagem da amostra de sulfato de amônio (SAM).....	61
Figura 33	- Imagem da amostra de FTE-BR12.....	61
Figura 34	- Imagem da amostra da formulação 07-11-09.....	61
Figura 35	- Imagem da amostra da formulação 03-17-00 com óleo.....	61
Figura 36	- Esteira para simulação de aplicação de fertilizantes	62
Figura 37	- Imagem calibrada das câmeras RGB e IR.....	66
Figura 38	- Calibração do quadro de captura	67
Figura 39	- Imagem IR original (esq.) e IR interpolada (dir.).....	68
Figura 40	- Sulfato de amônio (SAM) – imagem RGB (a), imagem IR (b) e imagem IR reconstruída (c)	76
Figura 41	- Leitura da massa da formulação 03-17-00 com óleo na esteira, sem e com o dosador <i>Fertisystem</i>	80
Figura 42	- Leitura da massa da formulação 03-17-00 com óleo na esteira, sem e com o dosador <i>Fertisystem</i> , após eliminação de <i>outliers</i>	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Distâncias Real x Kinect® em metros.	31
Tabela 2	- Total de pixels sem valor de distância.....	52
Tabela 3	- Medidas dos objetos	58
Tabela 4	- Amostras de fertilizantes utilizados no experimento.	60
Tabela 5	- Parâmetros retornados pela calibração da câmera RGB	65
Tabela 6	- Parâmetros retornados pela calibração da câmera IR.....	65
Tabela 7	- Pixels corrigidos	69
Tabela 8	- Variações de leitura do quatro de captura.	70
Tabela 9	- Medição de um objeto com iluminação artificial.	71
Tabela 10	- Medição de um objeto sem iluminação.....	71
Tabela 11	- Medição de 3 cubos sem iluminação.....	72
Tabela 12	- Medição de 3 cubos com iluminação.	73
Tabela 13	- Medição de 12 cubos sem iluminação.....	73
Tabela 14	- Medição de 12 cubos com iluminação.	74
Tabela 15	- Resultados obtidos com o sensor Kinect® para o superfosfato triplo (SFT).....	75
Tabela 16	- Resultados obtidos com o sensor Kinect® para o cloreto de potássio (KCl).....	76
Tabela 17	- Resultados obtidos com o sensor Kinect® para o sulfato de amônio (SAM).....	77
Tabela 18	- Resultados obtidos com o sensor Kinect® para o fertilizante FTE-BR12.....	77
Tabela 19	- Resultados obtidos com o sensor Kinect® para a formulação 07-11-09.	78
Tabela 20	- Resultados obtidos com o sensor Kinect® para a formulação 03-17-00 com óleo.	79
Tabela 21	- Leituras da formulação 03-17-00 com óleo na esteira com o dosador <i>Fertisystem</i>	80
Tabela 22	- Leituras da formulação 03-17-00 com óleo na esteira sem o dosador <i>Fertisystem</i>	80

LISTA DE SIGLAS

ANDA	Associação Nacional para Difusão de Adubos
D	Densidade
IFDC	<i>International Fertilizer Development Center</i>
M	Massa
VC	Valor Calculado
VR	Valor Real
V	Volume
SGN	Size Guide Number
R,G,B	Padrão de cores para imagens (Vermelho,Verde,Azul)
PCs	<i>Personal Computers</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
IR	<i>Infra Red</i> (Infra Vermelho)
SDK	<i>Software Development Kit</i>
NUI	<i>Natural User Interface</i>
SoC	<i>System-on-a-Chip</i> (PrimeSense)
TOF	<i>Time-of-Flight</i>
ROS	<i>Robot Operating System</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVO	14
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2	O PROBLEMA AGRONÔMICO ESTUDADO.....	15
2.1	ADUBOS OU FERTILIZANTES	15
2.2	A SEGREGAÇÃO E UNIFORMIDADE NA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES	16
3	O SENSOR KINECT®	21
3.1	A ARQUITETURA DO KINECT®	22
3.2	O FUNCIONAMENTO DO KINECT®	23
3.3	MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE DO KINECT®	25
3.3.1	Modelo matemático	26
3.3.2	Calibração	28
3.3.3	Calculo por disparidade do kinect®	29
3.4	PRECISÃO DA PROFUNDIDADE	30
3.4.1	Fontes de erros	32
3.4.2	Densidade de pontos	33
3.5	MEDIDAS NO MUNDO REAL.....	34
3.5.1	Parâmetros extrínsecos	36
3.5.2	Parâmetros intrínsecos	37
3.5.3	Coordenadas da imagem no mundo.....	38
3.5.4	Calibração	39
3.6	COR E PROFUNDIDADE.....	41
3.7	CALIBRAÇÃO DO KINECT®	43
4	MATERIAL E MÉTODOS	46
4.1	EQUIPAMENTOS E CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS	47
4.2	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE	48
4.2.1	Corrigindo erros de disparidade.....	50
4.2.2	Detectando o material adicionado.....	53
4.2.3	Cálculo das dimensões e volume	53
4.2.4	Calibração ir-rgb	55
4.2.5	Conversão rgb-hsv	56
4.3	EXPERIMENTO PARA VALIDAÇÃO	57
4.4	MEDIÇÃO DE FERTILIZANTES	60
4.5	EXPERIMENTO EM ESTEIRA.....	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
5.1	CALIBRAÇÃO	64
5.2	CALIBRAÇÃO IR-RGB	67
5.3	CORREÇÃO DE ERROS DE DISPARIDADE	68
5.4	VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA DO PIXEL.....	69
5.5	VALIDAÇÃO.....	70
5.6	MEDIÇÃO DE FERTILIZANTES	74
5.7	RESULTADOS DO EXPERIMENTO EM ESTEIRA	79
6	CONCLUSÕES.....	82

7	TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS	84
	GLOSSÁRIO	87

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da visão computacional, pesquisadores vêm investigando métodos de captura de imagens 3D de objetos. A grande ênfase, até pouco tempo, era dada à inspeção visual e à definição de rotas para robôs. O surgimento de novas tecnologias para obtenção de informações 3D, principalmente para jogos interativos, realidade virtual e comunicação, possibilitou o aumento das pesquisas em diversas áreas como medicina, arquitetura, educação, entre outras. O aumento na demanda por este tipo de tecnologia trouxe também uma forte redução nos custos de aquisição desses equipamentos (sensores), contribuindo para a difusão das pesquisas. O lançamento do sensor Kinect[®] em 2010 para a plataforma de jogos Xbox 360 da Microsoft popularizou essa tecnologia não só pelo baixo preço de aquisição do sensor, mas também pelo fato de as informações fornecidas pelo equipamento não possuir nenhum tipo de criptografia. Desde então, estudos vêm sendo realizados com o intuito de investigar o funcionamento do sensor e suas aplicações em áreas diversas.

Khoshelham (2011) investigou a qualidade geométrica de dados de profundidade obtidos com o sensor Kinect[®]. Com os resultados obtidos concluiu que o sensor Kinect[®] devidamente calibrado não contém grandes erros sistemáticos, quando comparado com dados de varredura a laser de um equipamento de alta capacidade e precisão. Nos testes realizados por Costa (2011) observou-se que os desvios ocorreram proporcionalmente ao aumento da distância do sensor.

Trabalhos voltados à área médica, como o de Rydén et al. (2011), utilizaram a capacidade do Kinect[®] em obter distâncias para medir, interpretar e reproduzir movimentos do braço humano em um braço robótico com o intuito de realizar cirurgias à distância.

A utilização do sensor Kinect[®] na agricultura é uma abordagem nova e praticamente não existem trabalhos sobre esse assunto na literatura. Recentemente, Correa (2012) realizou estudo na área de robótica aplicada a máquinas agrícolas, utilizando o sensor Kinect[®] acoplado a um pequeno veículo de eixo único com o objetivo de identificar e desviar obstáculos que encontrava pelo caminho. Este tipo de tecnologia poderá ser útil em aplicações de doses cada vez mais precisas de defensivos agrícolas em locais determinados, ou mesmo na colheita automatizadas de frutos.

Além do uso na robótica, a capacidade do Kinect[®] em obter distâncias e cores traz a oportunidade de utilizar o sensor em outras áreas da agricultura. Neste trabalho, foi estudada a viabilidade do uso do sensor para obter leituras e calcular a dosagem de um material aplicado

sobre uma superfície e, pelas cores, identificar a composição da mistura. Esse método pode ser viável para o controle da distribuição de fertilizantes ou para testes de regulagens de implementos agrícolas que envolvam aplicações de insumos no campo.

A importância deste estudo se justifica considerando as principais áreas utilizadas para a exploração agrícola no Brasil. Estas áreas ocorrem em solos de baixa fertilidade, e a produção tem sido viabilizada por meio do uso de corretivos e fertilizantes. A utilização de tais insumos mostra-se necessária não só para a manutenção da fertilidade do solo, mas também para a obtenção de altas produtividades das culturas. Os fertilizantes minerais têm sido os mais utilizados na agricultura, cujo consumo ultrapassou 28 milhões de toneladas no ano de 2011 (ANDA, 2012). A fabricação de fertilizantes minerais segue padrões e normas técnicas quanto às características físicas e químicas, de acordo com regulamentação do Ministério da Agricultura (Instrução Normativa N° 5, 2007), mas a distribuição dos fertilizantes no momento de sua aplicação podem ser influenciadas por vários fatores, dentre os quais se destacam as características físicas (densidade, tamanho, forma, coesão, ângulo de repouso, consistência e fluidez das partículas), alterando a dosagem desejada.

Os principais fertilizantes minerais são comercializados na forma de mistura de grânulos por apresentarem menor custo. Essas misturas podem conter grânulos de diferentes nutrientes com variados tamanhos e formas, sendo fundamental que os mesmos sejam uniformemente distribuídos no momento da aplicação. O transporte, a velocidade de deslocamento, a trepidação nos reservatórios durante a aplicação, a diversidade dos mecanismos distribuidores ou mesmo a falta de manutenção dos mecanismos da semeadora-adubadora podem gerar irregularidades na dosagem ao longo das linhas ou nas aplicações a lanço (MOLIN et al., 2009). Tais irregularidades na distribuição de fertilizantes podem causar danos às culturas pelo excesso (toxidade ou salinidade) ou falta (deficiência) de nutrientes para o desenvolvimento das plantas e levar a perdas econômicas importantes. Deve-se considerar também o impacto ambiental gerado pela aplicação excessiva de fertilizantes decorrente de irregularidades na sua distribuição, pois o nitrato (NO_3^-) se movimenta em direção ao lençol freático e o fósforo (P) pode ser arrastado superficialmente para cursos de água, causando poluição ambiental.

As perdas econômicas e os problemas ambientais causados por irregularidades na distribuição de fertilizantes justificam a necessidade de desenvolvimento de “ferramentas” ágeis e de baixo custo que possam ser utilizadas para medir a regularidade na distribuição dos fertilizantes minerais.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia capaz de avaliar a uniformidade na distribuição de grânulos de fertilizantes minerais por meio de medições da massa de fertilizantes aplicada manualmente em superfície e com sistema distribuidor em esteira com o auxílio de imagens digitais de cores e profundidade obtidas pelo sensor Kinect® da Microsoft.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em sete capítulos, incluindo esta introdução. O capítulo 2 apresenta o problema agrônômico estudado, iniciando com breve diferenciação entre fertilizantes orgânicos e minerais, e depois detalhando o problema e algumas técnicas tradicionais utilizadas nos estudos dos casos. O capítulo 3 apresenta detalhes do sensor Kinect® e de seu modo de funcionamento. O capítulo 4 descreve os métodos aplicados com o desenvolvimento do sistema para o tratamento dos dados obtidos pelo Kinect®, o experimento de validação e o experimento para medição de aplicação de fertilizantes minerais em esteira. O capítulo 5 apresenta os resultados e a discussão. O capítulo 6 descreve as conclusões e, por fim, o capítulo 7 faz menção aos trabalhos futuros de interesse para o avanço da técnica.

2 O PROBLEMA AGRONÔMICO ESTUDADO

Para facilitar o entendimento do problema da falta de uniformidade e segregação dos fertilizantes sólidos, faz-se necessário conhecer alguns aspectos relacionados com as suas propriedades físicas. Deficiências nessas propriedades causam problemas, como a formação de pó, má fluidez, empedramento e higroscopicidade excessiva, que juntamente com as ações mecânicas atreladas aos processos de sua fabricação, transporte e armazenamento, acabam por determinar a qualidade do produto no momento da sua aplicação no campo. Este capítulo tem o objetivo de compreender o problema da variabilidade na distribuição de fertilizantes e apresentar estudos relacionados que buscam quantificar, por meio de medições, o grau de variação no momento da aplicação dos fertilizantes.

2.1 ADUBOS OU FERTILIZANTES

Adubo ou fertilizante é um produto mineral ou orgânico, natural ou sintético, fornecedor de um ou mais nutrientes às plantas (ALCARDE et al., 1998).

Os fertilizantes orgânicos são aqueles constituídos de compostos de origem animal ou vegetal, enquanto os fertilizantes minerais são constituídos de compostos inorgânicos (compostos desprovidos de carbono). São também considerados fertilizantes minerais aqueles constituídos de compostos orgânicos (compostos que contêm carbono) sintéticos ou artificiais, como a uréia – $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, a calciocianamida e os quelatos.

Os fertilizantes minerais podem ser subdivididos em três classes:

- a. Fertilizantes simples: são fertilizantes constituídos fundamentalmente de um composto químico, contendo um ou mais nutrientes vegetais, quer sejam eles macro ou micronutrientes, ou ambos.
- b. Fertilizantes mistos ou misturas de fertilizantes: são fertilizantes resultantes da mistura de dois ou mais fertilizantes simples.
- c. Fertilizantes complexos: são misturas de fertilizantes resultantes de processo tecnológico em que se formam dois ou mais compostos químicos. São misturas produzidas com a participação de matérias primas (amônia – NH_3 , ácido sulfúrico – H_2SO_4 , ácido fosfórico – H_3PO_4), as quais dão origem a compostos químicos como sulfato de amônio – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, fosfato monoamônico (MAP) – $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, fosfato diamônico (DAP) – $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$.

Para Alcarde (1998), é importante distinguir o potencial de uso dos fertilizantes minerais e orgânicos. Utilizando-se o conceito de melhorador ou condicionador do solo, os produtos que promovem a melhoria dos atributos físicos (porosidade, aeração, capacidade de retenção de água) ou físico-químicos (capacidade de retenção de cátions) do solo são relacionados aos materiais orgânicos, sendo que sua eficácia é muito mais acentuada. A função de melhorar os atributos químicos do solo (conteúdo de nutrientes) fica reservada aos fertilizantes minerais. Isto porque os materiais orgânicos contêm nutrientes vegetais em baixíssimas concentrações que não se encontram em formas prontamente disponíveis às plantas, necessitando de grandes quantidades desses produtos para funcionarem como fertilizantes. Assim, o seu uso fica limitado pela disponibilidade dos produtos e pelo custo, principalmente do transporte. Essa distinção é muito importante porque é incorreta a comparação dessas duas classes de produtos como fertilizantes. Na verdade, o uso do material orgânico, na maior quantidade possível, faz-se necessário para aumentar a eficiência e a capacidade de absorção dos nutrientes providos pelos fertilizantes minerais. Por outro lado, essa distinção de funções serve também para desmistificar o caráter de agrotóxico que, não raro, é atribuído aos fertilizantes minerais.

2.2 A SEGREGAÇÃO E UNIFORMIDADE NA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES

A ocorrência de falhas na fabricação, transporte, manuseio, ou mesmo nas regulagens dos equipamentos distribuidores pode acarretar em falta de uniformidade das misturas de produtos. Este fenômeno é conhecido como segregação. A segregação é de fato um efeito indesejável, pois causa desuniformidade, podendo afetar a resposta agrônômica e não atender as garantias do produto (FELTRAN et al., 2006) (Figura 1).

A segregação ocorre quando os grânulos ou partículas de fertilizantes diferem em propriedades físicas a tal ponto que respondem diferentemente às perturbações mecânicas de transporte ou manuseio. Durante essas perturbações, partículas de propriedades físicas semelhantes tendem a se juntar, destruindo a uniformidade da mistura. Testes realizados por Feltran et al. (2006) e Rodela & Alcarde (1994) mostraram que a característica física de uma partícula de fertilizante que mais afeta a tendência à segregação é o seu tamanho. Partículas de fertilizantes de tamanhos diferentes tendem a segregar durante o manuseio.



Figura 1 - Desenvolvimento irregular de plantas pelo efeito da má distribuição de fertilizantes.

Fonte: Assessoria Agronômica da Bunge Fertilizantes SA, jun/2011.

Alguns estudos têm procurado avaliar a interferência dos mecanismos e os agentes responsáveis pela segregação dos fertilizantes, verificando a distribuição dos grãos de fertilizantes e a constância da formulação aplicada na largura ou comprimento da área de trabalho das distribuidoras. A uniformidade transversal da distribuição de fertilizantes a lanço tem grande dependência da qualidade e da condição física do produto a ser aplicado (MOLIN et al., 2009). Especialmente no caso das formulações, esse aspecto é relevante. Molin et al. (2009) avaliaram a distribuição dos grãos de fertilizantes e a constância da formulação aplicada na extensão da largura de trabalho de uma máquina distribuidora a lanço com dois fertilizantes. Foram efetuadas análises químicas do produto depositado em coletores dispostos transversalmente (Figura 2) e analisadas as distribuições individuais dos elementos das fórmulas. Os resultados evidenciaram que os fertilizantes apresentaram diferenças na sua formulação ao longo da largura, sendo que o fertilizante que continha micronutriente obteve maiores desvios (de até 100%) em relação à formulação aplicada, e sua segregação foi elevada em relação aos macronutrientes primários (até 9,5% para N) e secundários (até 39,0% para Ca), o que também indica distribuição de pior qualidade dos fertilizantes. O outro fertilizante apresentou desvios de até 17,8% para N e 34,1% para K na formulação ao longo da largura de aplicação.



Figura 2 - Coleta de amostras de aplicação transversal de fertilizantes.

Fonte: Molin et al. (2009)

Goetems et al. (2010) avaliaram a interferência de mecanismos dosadores helicoidais modificados (Fertisystem e Prometer) sobre a distribuição longitudinal de fertilizantes. O experimento variou as dosagens de fertilizantes com dois tipos de semeadora-adubadora com velocidade constante de 7 km/h sobre 40 bandejas de 0,215 por 0,300 m dispostas transversalmente sobre o solo sem falhas entre si, totalizando uma distância de 8,6 m (Figura 3). No experimento, após o funcionamento das semeadoras por arrasto sobre os reservatórios, o fertilizante contido em cada bandeja foi pesado, os valores foram transformados em kg ha^{-1} e, posteriormente, calculou-se o coeficiente de variação de cada parcela. Os resultados encontrados mostraram que a utilização de mecanismos helicoidais modificados, projetados para reduzir os pulsos ao longo da linha, ainda apresentaram problemas, evidenciando que mais estudos e modificações seriam necessários para realmente resolver ou minimizar a variação da vazão de adubo ao longo da linha com esses mecanismos.



Figura 3 - Coleta de amostras com uma aplicação longitudinal de fertilizantes.

Fonte: Departamento de Mecanização Agrícola – UNIOESTE, jun/2011.

Trabalho semelhante ao realizado por Goetems et al. (2010) foi desenvolvido por Gish et al. (2010). Nesse estudo, 40 bandejas foram dispostas longitudinalmente sobre o solo para avaliar a influência de quatro passos de rosca ($\frac{3}{4}$ ", 1", $1\frac{1}{2}$ " e 2") de um dosador helicoidal comum (rosca sem fim). Verificou-se que as médias de distribuição dos fertilizantes foram muito superiores com as regulagens iniciais. Isso pode ter ocorrido no momento da regulagem da engrenagem. Também se evidenciou que a utilização de roscas com passos maiores ($1\frac{1}{2}$ " e 2"), em doses menores, aumentou o efeito de pulsos na distribuição dos fertilizantes (GISH et al. 2010).

Feltran (2006) avaliou a segregação física e química de fertilizantes em formulações de misturas de grânulos e mistura granulada. Amostras das formulações foram obtidas tanto da superfície dos reservatórios quanto dos tubos de saída em níveis diferentes de rebaixamento. A segregação física dos componentes ocorreu tanto na mistura de grânulos como na mistura granulada. Isso pode ser explicado pelas diferenças na granulometria das matérias primas utilizadas nos formulados compostos por mistura de grânulos. Deve-se ressaltar que dentro da mesma fonte do nutriente ocorre variação nas partículas quanto ao tamanho, à densidade e aos ângulos de repouso. Entretanto, para a mistura granulada, observou-se que a segregação foi decorrente de problemas relacionados com a fabricação, a dureza dos grânulos e/ou por esmagamento durante a aplicação, fatores que contribuem para maior segregação dos fertilizantes (Figura 4).



Figura 4 - Segregação física do fertilizante mineral em uma mistura de grânulos.

Fonte: Assessoria Agronômica da Bunge Fertilizantes SA, jun/2011.

A segregação de formulações de mistura de grânulos também foi avaliada na embalagem e transporte de alta capacidade, do tipo BIG BAG. Tosato (2006) observou influência do tamanho dos grânulos das matérias primas nos resultados das análises químicas e granulométricas, nos vários pontos de amostragem realizados após o envase e o transporte neste tipo de embalagem. Formulações com grânulos de tamanhos homogêneos, dentro de uma variação de $\pm 5\%$ do SGN (Size Guide Number), apresentaram menores problemas de segregação, independentemente dos pontos de amostragem.

3 O SENSOR KINECT®

O sensor Kinect® (Figura 5) foi lançado em novembro de 2010 (MICROSOFT, 2010) para ser conectado ao console de jogos Xbox 360 da Microsoft. Com o objetivo de permitir a interação com os jogos sem a necessidade do envio remoto, uso de joystick ou qualquer outra forma de dispositivo, foi concebido para reconhecer o movimento humano e traduzi-lo em ações ou comandos. É composto por um conjunto de três tipos de sensores, sendo uma câmera RGB (*Red, Green, Blue*), uma câmera IR (*Infra-red*) e sensores acústicos, todos desenvolvidos pela israelense PrimeSense (PRIMESENSE, 2011a). O sensor de profundidade consiste num laser de infravermelhos combinado com um sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) que pode capturar dados de vídeo em 3D sob qualquer ambiente luminoso, exceto em lugares externos com iluminação solar.



Figura 5 - Sensor Microsoft Kinect®

Fonte: Microsoft (2010)

Os sistemas desenvolvidos para captura de imagens de objetos em 3D, normalmente eram construídos utilizando hardwares especializados (scanners a laser), resultando em alto custo, e restritos a poucos ambientes de pesquisa. O lançamento do sensor Kinect® pela Microsoft, com o intuito de ser apenas mais um acessório ao seu console de vídeo game, acabou sendo adotado pela comunidade científica como sensor 3D de baixo custo. Sua capacidade de capturar imagens e informações de profundidade do ambiente tornou-o utilizável para outros fins além do que foi originalmente projetado. A principal característica dos scanners 3D de baixo custo é que as informações de profundidade e cor são capturadas por sensores distintos. Como consequência, elas surgem de forma independente, requerendo um cálculo adicional capaz de relacioná-las. Tal cálculo é conhecido por registro, triangulação ou calibração das câmeras ou sensores e será detalhado neste capítulo.

Em fevereiro de 2012, a Microsoft lançou uma nova versão do sensor apropriada para desenvolvedores, chamada Kinect® for Windows (MICROSOFT, 2012), além de uma

biblioteca própria para desenvolvimento. Com as vendas liberadas apenas nos EUA e União Europeia, a versão do sensor só chegou ao Brasil em julho de 2012.

Antes do lançamento do sensor Kinect[®] for Windows, os desenvolvedores já utilizavam o sensor Xbox Kinect[®] ligados aos seus PC's (*personal computer*) utilizando bibliotecas de uso livre, chamada OpenNI (OPENNI, 2010). A organização OpenNI, formada por empresas que desenvolvem sensores semelhantes e a própria PrimeSense, criadora do sensor de profundidade utilizada no Kinect[®], coincidentemente em novembro de 2010, disponibilizou um framework de código aberto com o objetivo de promover a compatibilidade e interoperabilidade de dispositivos de interface natural. Desde então, os recursos do sensor vêm sendo testados nas áreas de medicina e robótica, e neste trabalho na agricultura.

3.1 A ARQUITETURA DO KINECT[®]

O sensor Kinect[®] é composto por uma barra horizontal, onde está localizado um conjunto de diferentes sensores, sobre uma pequena base com um motor de inclinação. Como ilustrado na Figura 6, os componentes do sensor são (PRIMESENSE, 2011a):

1. Conjunto de quatro microfones para identificar a origem de vozes e sons ao filtrar o ruído de fundo e ecos;
2. Emissor de IR que projeta um padrão de luz infravermelha e, à medida que esta luz atinge as superfícies, o padrão torna-se distorcido, sendo a distorção lida pela câmara de profundidade;
3. Câmera de profundidade que analisa padrões de IR para a construção de um mapa 3D da sala e todos os objetos e as pessoas dentro dele;
4. Motor de inclinação que se ajusta automaticamente com base no objeto à sua frente, para cima ou para baixo, para obter melhor enquadramento de acordo com sua altura e proximidade;
5. Cabo USB que transmite dados para o Xbox através de um feed sem criptografia, o que torna relativamente fácil o uso do Kinect[®] com outros dispositivos.
6. Câmera colorida padrão RGB para a captura de uma imagem de vídeo. O Kinect[®] usa essas informações para obter detalhes sobre objetos e pessoas na sala.

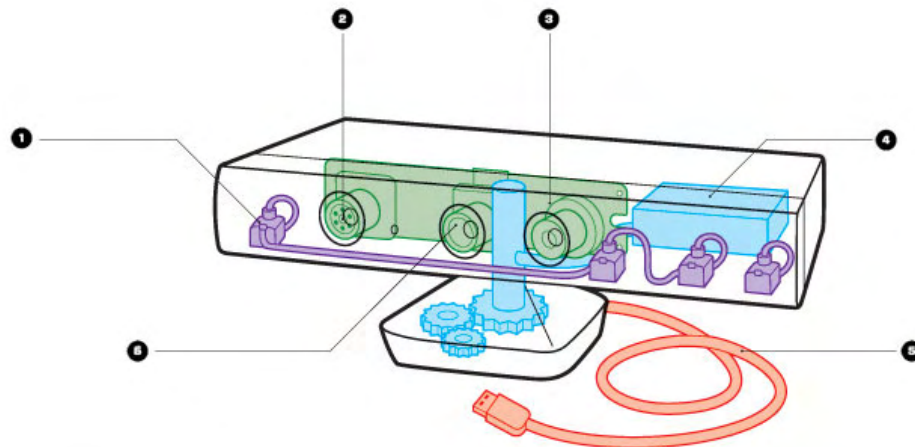


Figura 6 - Arquitetura do sensor Kinect®

Fonte: Primesense (2011a)

3.2 O FUNCIONAMENTO DO KINECT®

A componente central do Kinect® é a câmera de profundidade, e a tecnologia para aquisição da imagem é baseada no *Light Coding™* desenvolvido pela PrimeSense. O *Light Coding™* codifica o cenário com raios infravermelhos. Estes raios são invisíveis ao olho humano, sendo considerado de classe 1 segundo o Laser Safety (PRIMESENSE, 2011b) e compatível com a norma 60825-1 da *International Electrotechnical Commission* (IEC).

O Kinect® utiliza um sensor de imagem CMOS padrão, para ler os raios que foram refletidos pelo cenário, e transfere-os ao microcontrolador PrimeSense PS1080 SoC (*System on a Chip*). O PS1080 SoC é capaz de controlar a luz estruturada com o auxílio de um difusor de luz e processar os dados do sensor de imagem para fornecer dados de profundidade em tempo real (VILAROMAN, 2011), criando uma imagem de profundidade da cena (Figura 7).

O *Light Coding™* funciona por triangulação a partir de padrões armazenados na memória do sensor e é diferente do método chamado TOF (*Time of Flight*) ou câmera de tempo de voo. As câmeras TOF resolvem a distância baseadas na velocidade da luz, medindo o tempo percorrido de um sinal de luz entre a câmera e um objeto para cada ponto da imagem. Quando um feixe de laser ou um flash é disparado, a luz sai da câmera e é refletida pelos objetos em sua frente. A matriz de sensores da câmera detecta a luz que volta. Cada pixel na imagem é cronometrado medindo o tempo que a luz levou para sair do flash ou laser, refletir em algum objeto e retornar ao sensor. Efetivamente, cada pixel funciona como um sensor independente (BENGUIGUI, 2010). Sabendo-se que a velocidade da luz é altíssima, de 300

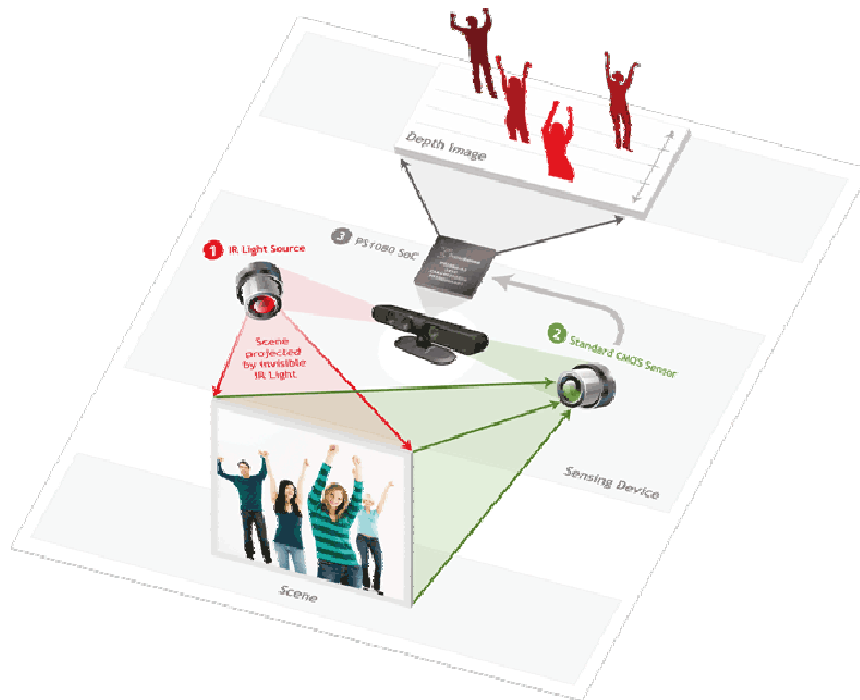


Figura 7 - Criação da imagem de profundidade

Fonte: Primesense (2011c)

mil quilômetros por segundo, para um objeto há dois metros da câmera, a luz percorreria quatro metros do percurso de ida e volta num tempo de 13 nanosegundos. Este tempo pode parecer curto, mas um simples processador de 2 GHz executa 2 milhões de instruções por segundo, isto é, uma operação a cada 60 nanosegundos. Câmeras TOF já são capazes de obter 1000 imagens a cada segundo, com uma resolução de 320×240 pixels (BENGUIGUI, 2010).

A câmera RGB do Kinect® libera um fluxo de imagem com resolução de 640×480 pixels há 30 quadros por segundo e um fluxo de 1280×1024 pixels a 15 quadros por segundo. O sensor de profundidade libera um fluxo com formato de 640×480 pixels a 30 quadros por segundo ou 320×240 pixels a 30 quadros por segundo, com informações sobre o jogador. A distância de cada pixel (da câmera ao objeto) é informada com precisão de 11 bits, com valores entre 0 e 2047. Dessa forma, o fluxo de imagem fornece as cores, o fluxo de profundidade retorna a distância de cada pixel da câmera até o objeto e o fluxo de áudio liberado pelo sensor fornece o som captado pelos quatro microfones. Os três fluxos de informação enviados pelo sensor não são criptografados, assim podem ser utilizados por

bibliotecas de código aberto (*open source*) como a OpenNI e da fabricante Microsoft chamada *NUI Library* (Natural User Interface) que faz parte do pacote SDK (Figura 8).

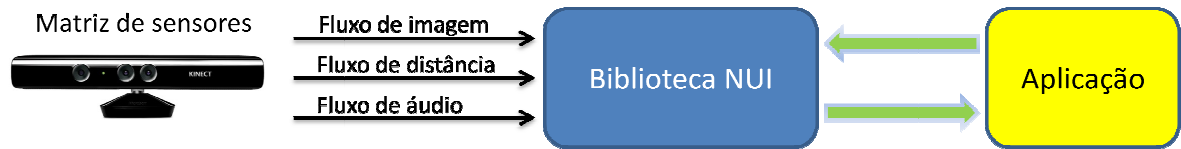


Figura 8 - Arquitetura de comunicação do Kinect®

Fonte: Primesense (2011c)

A câmera de profundidade é capaz de registrar distâncias entre 0,6 m e 6 m nos sensores Kinect® para Xbox 360 e nas versões do Kinect® para Windows as distâncias estão entre 0,4 m e 10 m. Essa diferença entre as versões do sensor é devida à utilização projetada do Kinect® para Windows, visando desenvolvedores e usuários de computadores que normalmente ficam posicionados mais próximos ao sensor. Um detalhe na versão para Windows do Kinect® é a necessidade de ativar o “modo perto” (*near mode*) para trabalhar com distâncias a partir de 0,4 m. A utilização do sensor mais próximo a objetos resulta no aumento da densidade de informações e uma melhor precisão.

3.3 MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE DO KINECT®

Os componentes para medição de profundidade do sensor Kinect® consistem de um emissor de laser de infravermelhos e uma câmera de infravermelhos. Os inventores descrevem a medição de profundidade por um método de triangulação (FREEDMAN et al., 2010). A fonte de laser emite um feixe simples que é dividido em feixes múltiplos por uma rede de difração para criar um padrão de manchas constante projetado na cena. Este padrão é capturado pela câmara de infravermelhos e correlacionado com um padrão de referência. O padrão de referência é obtido a uma distância conhecida a partir do sensor e armazenado na sua memória. Quando uma mancha é projetada em um objeto cuja distância do sensor é menor ou maior do que a do plano de referência da posição da mancha na imagem de infravermelhos há um descolamento na direção da linha de base entre o projetor de laser e o centro de perspectiva da câmara de infravermelhos. Essas mudanças são medidas para todas

as manchas de uma imagem simples por um procedimento de correlação, o que produz uma imagem de disparidade para cada pixel (Figura 9). A distância em relação ao sensor pode então ser recuperada a partir da disparidade correspondente conforme modelo matemático que será descrito na próxima seção.

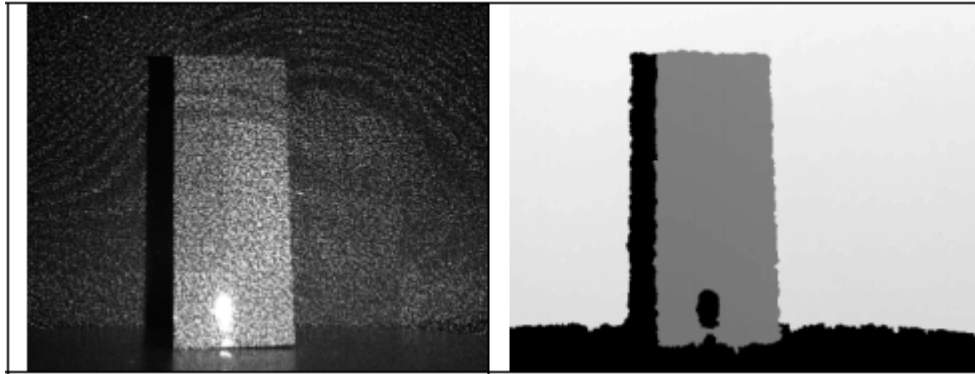


Figura 9 - Padrão de manchas projetadas para medir a profundidade.

Fonte: Khoshelham (2011)

3.3.1 Modelo matemático

A Figura 10 ilustra a relação entre a distância de um objeto no ponto k para o sensor em relação a um plano de referência, e a medida d (disparidade). Para expressar as coordenadas 3D do ponto do objeto, considerou-se um sistema de coordenadas com a sua profundidade com origem no centro do ponto de vista da câmara de infravermelhos. O eixo Z

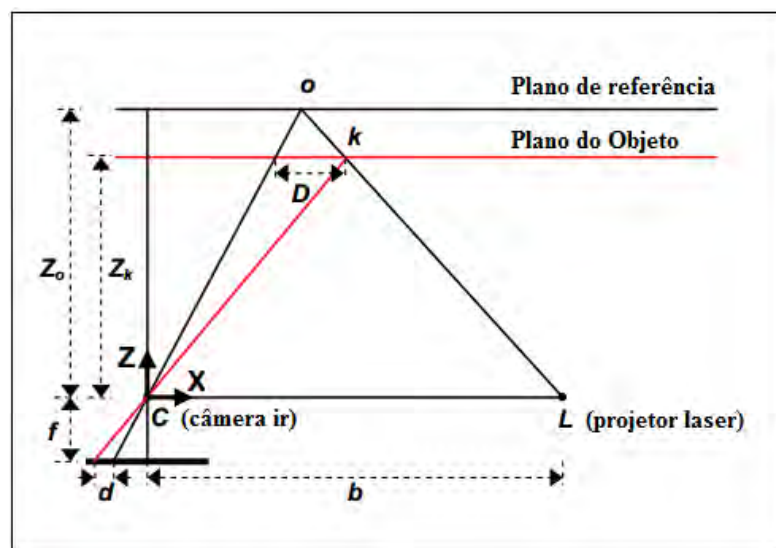


Figura 10 - Representação esquemática da relação profundidade-disparidade

Fonte: Khoshelham (2011)

é ortogonal ao plano da imagem para o objeto, o eixo $\mathbf{X}$ é perpendicular ao eixo $\mathbf{Z}$ na direção da linha de base $\mathbf{b}$ entre o centro da câmara de infravermelhos e o projetor de laser, e o eixo $\mathbf{Y}$ é ortogonal a $\mathbf{X}$ e $\mathbf{Z}$, completando o sistema de coordenadas (KHOSHELHAM, 2011).

Supondo que um objeto está sobre o plano de referência há uma distância $\mathbf{Z}_0$ para o sensor, e uma mancha do objeto é capturada sobre o plano de imagem da câmara de infravermelho, se o objeto é deslocado para mais perto ou mais longe do sensor, a localização das manchas sobre o plano de imagem será deslocada na direção $\mathbf{X}$. Isto é medido no espaço de imagem como $\mathbf{d}$ (disparidade) correspondente a um ponto $\mathbf{k}$ no espaço de objetos. A partir da semelhança de triângulos, tem-se:

$$\frac{\mathbf{D}}{\mathbf{b}} = \frac{\mathbf{Z}_0 - \mathbf{Z}_k}{\mathbf{Z}_0} \quad (1)$$

$$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{f}} = \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{Z}_k} \quad (2)$$

onde, $\mathbf{Z}_k$ indica a distância (profundidade) do ponto $\mathbf{k}$ de objeto no espaço, $\mathbf{b}$ é o comprimento da base, $\mathbf{f}$ é a distância focal da câmara de infravermelho, $\mathbf{D}$ é o deslocamento do ponto $\mathbf{k}$ no espaço do objeto, e $\mathbf{d}$ é a disparidade observada no espaço de imagem. Substituindo $\mathbf{D}$ a partir de (2) em (1), e $\mathbf{Z}_k$ expressa em termos de outras variáveis, tem-se:

$$\mathbf{Z}_k = \frac{\mathbf{Z}_0}{1 + \frac{\mathbf{Z}_0}{\mathbf{f}\mathbf{b}}\mathbf{d}} \quad (3)$$

A equação (3) é o modelo matemático básico para a derivação de profundidade a partir da disparidade observada, considerando que a constante $\mathbf{Z}_0$ e os parâmetros $\mathbf{f}$ e $\mathbf{b}$ podem ser determinados por calibração. A coordenada $\mathbf{Z}$ de um ponto junto com $\mathbf{f}$ define a escala da imagem para esse ponto. As coordenadas planimétricas do objeto de cada ponto podem então ser calculadas a partir de suas coordenadas de imagem e a escala pela equação:

$$\begin{aligned}
X_k &= -\frac{Z_k}{f}(x_k - x_0 + \delta x) \\
Y_k &= -\frac{Z_k}{f}(y_k - y_0 + \delta y)
\end{aligned}
\tag{4}$$

onde, x_k e y_k são as coordenadas do ponto, x_0 e y_0 são as coordenadas do ponto principal, e δx e δy são correções para a distorção da lente. Para estas distorções existem coeficientes diferentes para cada modelo de câmera (FRASER, 2006). Nesse modelo foi assumido que o sistema de coordenadas de imagem é paralelo com a linha de base e, conseqüentemente, com o sistema de coordenadas de profundidade (KHOSHELHAM, 2011).

3.3.2 Calibração

Os parâmetros de calibração envolvidos no modelo matemático para o cálculo das coordenadas 3D a partir das medições da imagem incluem (KHOSHELHAM, 2011):

- Distância focal (f);
- Ponto principal de deslocamento (x_0, y_0);
- Coeficientes de distorção da lente (em $\delta x, \delta y$);
- Comprimento da base (b);
- Distância do padrão de referência (Z_0).

Além desses, pode-se considerar também um ângulo de desalinhamento entre o eixo x do sistema de coordenadas da imagem e a linha de base. No entanto, isto não afeta o cálculo da coordenada do objeto se o sistema de coordenadas de profundidade for definido para ser paralelo ao sistema de coordenadas da imagem, em vez da linha base. Pode-se, portanto, ignorar esse ângulo de desalinhamento (KHOSHELHAM, 2011). A partir de tais parâmetros de calibração, os três primeiros podem ser determinados por um padrão de calibração da câmera de infravermelhos. A determinação do comprimento da base e a distância de referência, no entanto, são complicadas, pois na prática não é possível transmitir as disparidades reais medidas, provavelmente em decorrência da limitação da largura de banda. Em vez disso, os valores de disparidade são normalizados entre 0 e 2047, e transmitidos como 11 bits inteiros. Por isso, na equação (3) d deve ser substituído com $md' + n$ sendo d' a disparidade normalizada e m, n os parâmetros de uma normalização linear. Incluindo estes na equação (3) e invertendo, tem-se:

$$\mathbf{Z}_k^{-1} = \left(\frac{\mathbf{m}}{f\mathbf{b}} \right) \mathbf{d}' + (\mathbf{Z}_0^{-1} + \frac{\mathbf{m}}{f\mathbf{b}}) \quad (5)$$

A equação (5) expressa uma relação linear entre o inverso da profundidade de um ponto e a sua correspondente disparidade normalizada. Observando-se a disparidade normalizada para certo número de pontos de objeto (ou plano) em distâncias conhecidas para o sensor, os coeficientes dessa relação linear podem ser estimados na forma de mínimos quadrados. No entanto, a inclusão dos parâmetros de normalização não permite determinar $\mathbf{b}$ e $\mathbf{Z}_0$ separadamente.

3.3.3 Cálculo por disparidade do Kinect®

O cálculo da profundidade em um modelo estereoscópico é calibrado de forma que as imagens sejam paralelas e tenham linhas horizontais correspondentes. Para um sistema desse tipo, tem-se:

$$z = \frac{bf}{d} \quad (6)$$

onde, z corresponde à profundidade em metros, b a distância entre câmeras, f a distância focal em pixel, e d a disparidade também em pixel (ROS, 2010). Em uma situação de disparidade zero, a profundidade é infinita, o que corresponde a uma situação em que os raios de cada câmara se encontram paralelos. Esta situação pode corresponder a um caso em que as imagens não estão sobrepostas e, por isso, não é possível inferir sobre a profundidade. No entanto, no Kinect®, a disparidade não está normalizada dessa forma, isto é, uma disparidade nula não corresponde a uma profundidade infinita. No caso do Kinect®, a disparidade normalizada é calculada da seguinte forma:

$$d = \frac{1}{8}(d_{off} - K_d) \quad (7)$$

onde, d é a disparidade normalizada, K_d a disparidade retornada pelo Kinect®, e d_{off} um valor de *offset* particular a cada Kinect®. O coeficiente $\frac{1}{8}$ resulta da conversão de unidades de [pixel] para $[\frac{pixel}{8}]$. Isto posto, o cálculo da profundidade do Kinect® pode ser expresso da seguinte forma:

$$z = \frac{bf}{\frac{1}{8}(d_{off} - K_d)} \quad (8)$$

onde, b é a distancia entre o projetor e a câmera IR (aproximadamente 0,075m) e d_{off} um valor próximo a 1090.

3.4 PRECISÃO DA PROFUNDIDADE

Um fator relevante para utilização dos sensores de baixo custo é conhecer a capacidade e a exatidão das leituras em relação ao que se pretende implementar. No caso do Kinect®, Costa (2011) efetuou medições por meio de um experimento obtendo as distâncias do sensor em relação a um plano. As leituras foram obtidas variando as distâncias em intervalos de 0,25 m, tomando como base pontos fixos do plano como as extremidades e o centro. A Tabela 1 mostra as distâncias medidas pelo sensor e as distâncias do plano real, considerando apenas o ponto central como referência. Os resultados dos testes na Tabela 1 e Figura 11 mostram as diferenças nas leituras das distâncias realizadas pelo Kinect®. Nota-se que as diferenças vão se acentuando à medida que as distâncias aumentam.

Esse fato pode ser explicado devido aos pontos projetados pelo Kinect® variarem em tamanho e forma conforme a distância e orientação do plano ou objeto do sensor. O feixe emitido pode ser considerado como tendo forma cônica, em que o vértice coincide com o sensor. Desta forma, o tamanho do ponto projetado aumenta quanto maior for a distância do emissor. A forma do feixe a uma dada distância varia com a orientação do plano ou objeto, dado que a projeção de um feixe luminoso afeta naturalmente a forma do ponto, tendendo para uma forma mais ou menos oval consoante à inclinação do objeto. O fato de o aumento do tamanho dos pontos ser proporcional à distância leva a uma perda de precisão, dado que a triangulação será feita sobre pontos maiores e, por isso, o cálculo de profundidade será mais ambíguo e incerto para distâncias maiores.

Tabela 1 - Distâncias Real x Kinect® em metros.

Distância Real (m)	Distância Kinect (m)
<0,50	
0,50	0,50
0,75	0,75
1,00	1,00
1,25	1,25
1,50	1,50
1,75	1,75
2,00	1,99
2,25	2,25
2,50	2,51
2,75	2,77
3,00	3,03
3,25	3,25
3,50	3,51
3,75	3,78
4,00	4,04
4,25	4,29
4,50	4,57
4,75	4,88
5,00	5,10
5,25	5,33
5,50	5,58
5,75	5,86
6,00	6,17

Fonte: Costa (/2011)

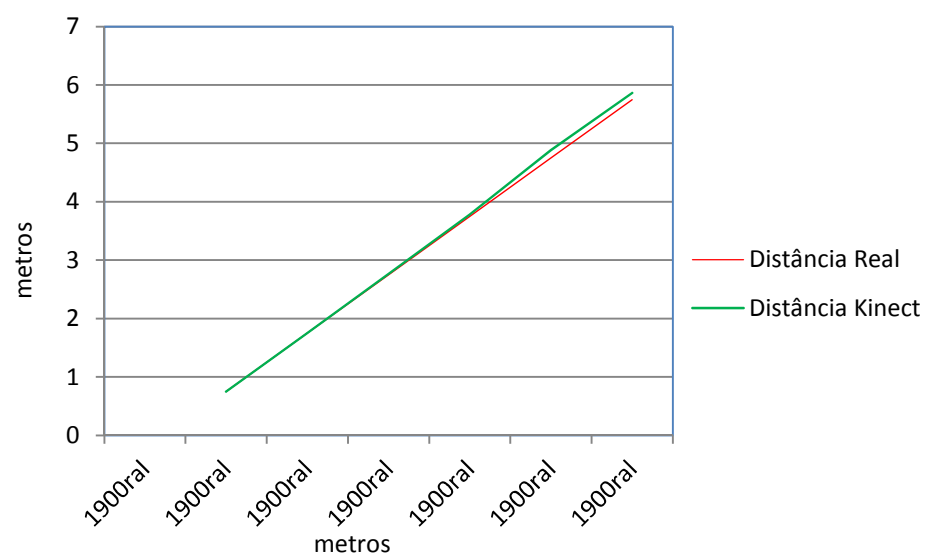


Figura 11 - Distância Real x Kinect®

Fonte: Costa (/2011)

Precisão e densidade de pontos são duas medidas importantes para avaliar a qualidade de uma nuvem de pontos (Figura 12). Nas seções seguintes serão discutidos alguns fatores que influenciam na precisão de dados do Kinect®.

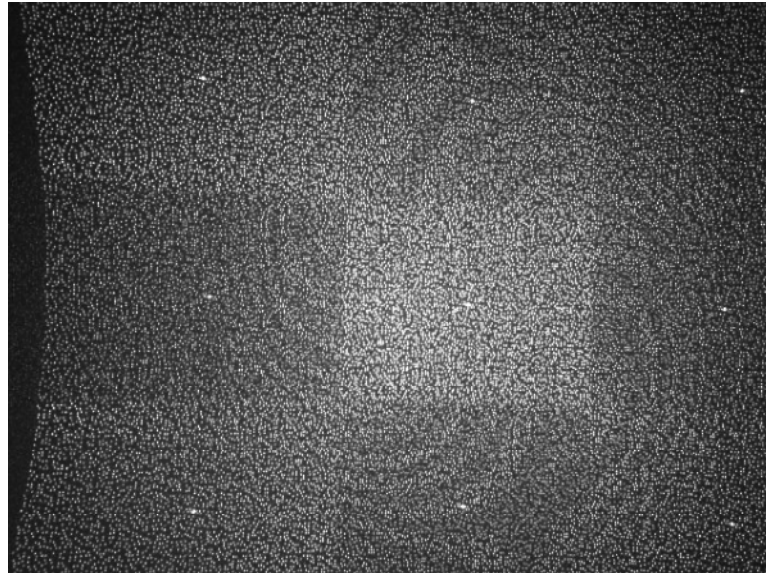


Figura 12 - Imagem IR da nuvem de pontos projetada pelo Kinect®

Fonte: Costa (/2011)

3.4.1 Fontes de erros

Erro e imperfeição nos dados do Kinect® podem ser originários de três fontes principais (COSTA, 2011):

- O sensor;
- A configuração de medição;
- As propriedades da superfície do objeto.

Os erros de sensores, de um dispositivo que funcione corretamente, referem-se à calibração inadequada e à medição imprecisa de disparidades. Calibração inadequada e/ou erro na estimativa dos parâmetros de calibração levam a um erro sistemático no objeto de coordenadas de pontos individuais. Tais erros sistemáticos podem ser eliminados por uma calibração adequada. Medição imprecisa das disparidades dentro do algoritmo de correlação e erros de arredondamento durante a normalização resultam em erros que são mais prováveis por natureza aleatória.

Erros causados pela configuração de medição estão principalmente relacionados com as condições de iluminação e da geometria de imagem. A condição de iluminação influencia a

correlação e a medição de disparidades. Na luz forte, as manchas de laser aparecem em baixo contraste na imagem de infravermelhos, o que pode levar à ocorrência de "outliers" ou erosões na nuvem de pontos resultante. A geometria de imagem inclui a distância do objeto e a orientação da superfície do objeto em relação ao sensor. A gama de funcionamento do sensor varia de acordo com a versão (Xbox ou Windows) e o erro aleatório de profundidade aumenta com o aumento da distância do sensor. Além disso, dependendo da geometria da imagem, partes da cena podem ser ocluídas ou sombreadas. Na Figura 9, o lado direito da caixa está obstruído uma vez que ele não pode ser visto pela câmara de infravermelhos, embora possa ter sido iluminado pelo padrão de laser. O lado esquerdo da caixa está sombreado porque não está iluminado pelo laser, mas foi capturado na imagem infravermelha. Tanto as áreas oclusas e as sombras aparecem como lacunas na nuvem de pontos.

As propriedades da superfície do objeto também podem influenciar a medição de pontos. Como pode ser visto na Figura 9, superfícies lisas e brilhantes que aparecem super expostas na imagem de infravermelho (a parte inferior da caixa) impedem a medição de disparidades, e resulta em uma erosão na nuvem de pontos.

3.4.2 Densidade de pontos

A resolução da câmara de infravermelhos, isto é, o tamanho do pixel, determina o espaçamento de pontos dos dados de profundidade no plano XY (perpendicular ao eixo da câmara). Uma vez que cada imagem de profundidade contém uma constante de 640×480 pixels, a densidade de pontos irá diminuir com o aumento da distância da superfície do objeto a partir do sensor. Considerando-se a densidade de pontos de medida como o número de pontos por unidade de área, ao passo que o número de pontos se mantém constante, a área é proporcional ao quadrado da distância entre o sensor. Portanto, a densidade de pontos é inversamente proporcional ao quadrado da distância a partir do sensor, que é a seguinte (KHOSHELHAM, 2011):

$$p \propto \frac{1}{Z^2} \quad (9)$$

A resolução de profundidade é determinada pelo número de bits por pixel usados para armazenar as medições de disparidade. As medições de disparidade do Kinect® são armazenadas em 11 bits inteiros, onde um bit é reservado para marcar os pixels para os quais

não houve medição de disparidade, isto é, chamada sem dados (erosões). Portanto, a imagem de uma disparidade contém 1.024 níveis de disparidade. Uma vez que a profundidade é inversamente proporcional à disparidade, a resolução de profundidade é também inversamente relacionada com os níveis de disparidade. Assim, a resolução de profundidade não é constante e diminui com o aumento da distância do sensor. Por exemplo, há uma distância de 2 m, um nível de disparidade corresponde a 1 cm de resolução de profundidade, enquanto que a 5 m, um nível de disparidade corresponde a cerca de 7 cm de resolução de profundidade (KHOSHELHAM, 2011).

3.5 MEDIDAS NO MUNDO REAL

O sensor Kinect[®] fornece informações que permitem obter parâmetros de cada pixel da imagem e relacioná-los a posições do mundo real. Nesta seção será descrito o método utilizado para calcular esses dados. Essas informações serão úteis para o entendimento do método de cálculo das dimensões dos objetos e dos materiais analisados nesse estudo.

O Kinect[®] é um sensor fortemente baseado em visão. Em sistemas baseados em visão é essencial determinar a relação matemática da transformação dos pontos 3D do mundo real em pontos 2D da imagem. Os parâmetros do modelo da câmera determinam esta relação e, normalmente, são divididos em dois grupos chamados parâmetros intrínsecos e extrínsecos (TRUCCO & VERRI, 1998).

Parâmetros intrínsecos representam as características ópticas e geométricas internas da câmera, como a distância focal f , fatores de escala (δ_x , δ_y), a posição em pixel da projeção ortogonal do centro ótico no plano de projeção (c_x , c_y), e as imperfeições geométricas introduzidas pelo sistema sensor da câmara s . Simplificando, os parâmetros intrínsecos são necessários para relacionar o ponto das coordenadas do pixel com o sistema de coordenadas da câmera.

Os parâmetros extrínsecos fornecem a posição e orientação da câmara em uso, definidas por meio de uma matriz de rotação R e um vetor de translação T , em relação a um certo sistema de coordenadas 3D global (mundo).

Uma forma simples de explicar essa parametrização pode ser demonstrada ao se aplicar o exemplo ao modelo de câmera *pinhole*. Este tipo de câmara consiste numa caixa opaca com um pequeno orifício por onde a luz consegue penetrar. Quando a luz é captada

pela câmara, atravessa o orifício e a imagem do meio é projetada no plano oposto ao orifício de forma invertida (Figura 13).

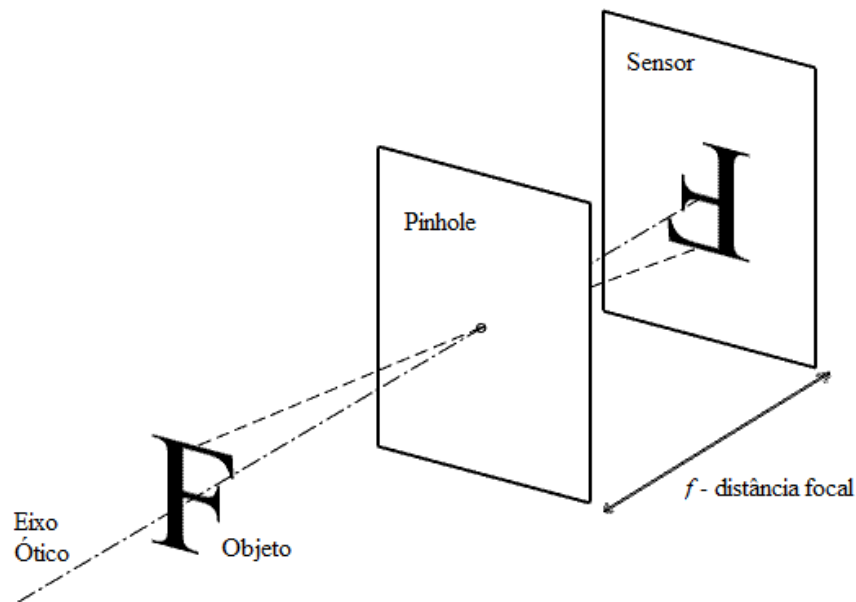


Figura 13 - Funcionamento da câmera pinhole

Fonte: Costa (/2011)

A Figura 14 mostra um modelo de representação das coordenadas de pontos no espaço tridimensional e as coordenadas destes pontos na imagem. As equações normalmente referem-se ao sistema de coordenadas da câmera, sendo as projeções dos pontos na imagem dadas pelas coordenadas linha e coluna em número de pixels, onde f (distancia focal) é a

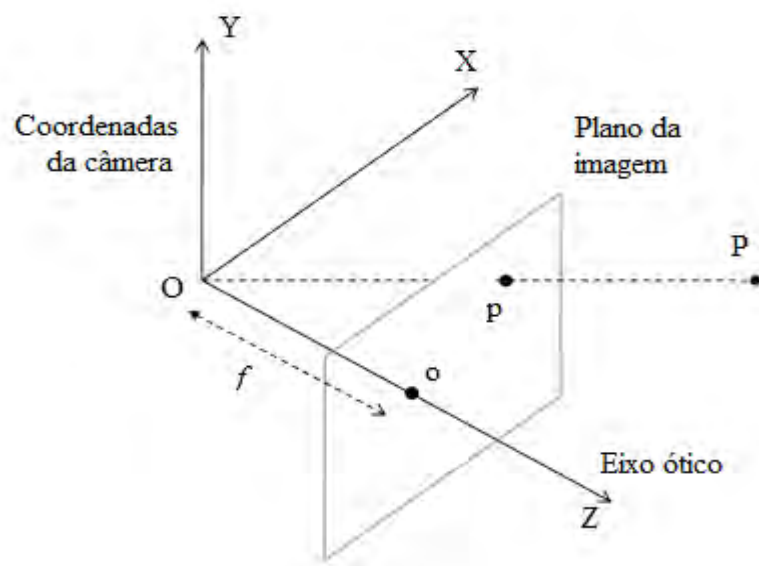


Figura 14 - Modelo de projeção da câmera

Fonte: Costa (/2011)

distância entre o plano da imagem e o centro O de coordenadas da câmera e o ponto o chamado de ponto principal ou centro da imagem, onde ocorre a interseção da linha do eixo ótico com o plano da imagem (TRUCCO & VERRI, 1998).

As equações básicas do sistema de coordenadas da câmera podem ser representadas como:

$$\begin{aligned} x &= f \frac{X}{Z} \\ y &= f \frac{Y}{Z} \end{aligned} \quad (10)$$

sendo (x,y) as coordenadas do ponto na imagem e (X,Y,Z) as coordenadas do ponto no espaço, ou coordenadas do mundo. O que promove a relação entre estes dois pontos (projeção da imagem e ponto no mundo) são os parâmetros extrínsecos e intrínsecos, mostrados na próxima subseção.

3.5.1 Parâmetros extrínsecos

Os parâmetros extrínsecos definem a transformação geométrica que relaciona unicamente o sistema de coordenadas da câmera ao sistema de coordenadas do mundo por meio de um vetor de translação 3D, T que descreve a posição relativa entre as origens dos dois sistemas e uma matriz ortogonal 3×3 R , que expressa a rotação relativa entre os eixos de um e outro sistema de coordenadas. Desta forma, como mostra a

Figura 15, a relação entre o sistema de coordenadas do ponto P da imagem representada no mundo por P^m e na câmera por P^c é:

$$P^c = R P^m + T \quad (11)$$

na qual:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

e

$$T = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} \quad (13)$$

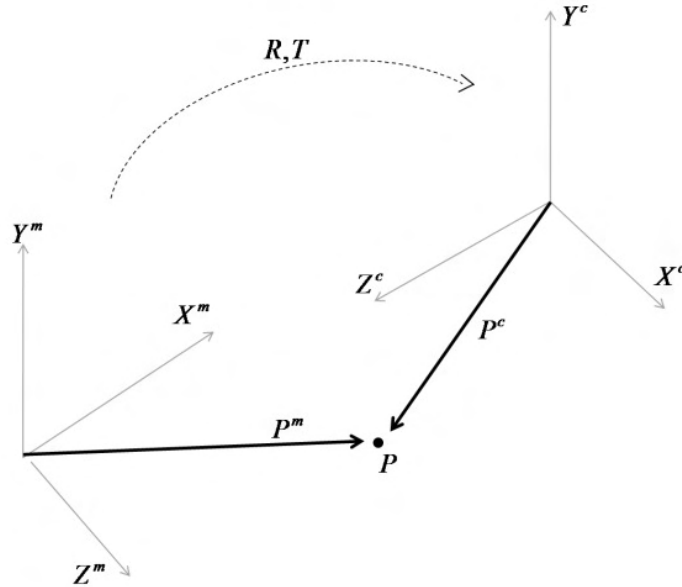


Figura 15 - Transformação das coordenadas do mundo para coordenadas da câmera

3.5.2 Parâmetros intrínsecos

Os parâmetros intrínsecos caracterizam as influências óticas, geométricas e digitais da câmera na imagem devido às variações de cada modelo podendo ter diferentes relações de distância focal, dimensões horizontal e vertical dos pixels na matriz de sensores, coordenadas do vetor que representa o deslocamento da origem do sistema de coordenadas da imagem relativa ao ponto em que o eixo ótico atinge o plano de projeção e distorção geométrica causada pela ótica (TRUCCO & VERRI, 1998)..

Ao determinar a relação de um ponto no sistema de coordenadas da imagem em pixel (x^{im}, y^{im}) e do mesmo ponto no sistema de coordenadas da câmera (x^c, y^c) , tem-se:

$$x^c = -(x^{im} - o_x)s_x \quad (14)$$

$$y^c = -(y^{im} - o_y)s_y \quad (15)$$

onde, (o_x, o_y) são as coordenadas em pixel do centro da imagem e (s_x, s_y) o tamanho efetivo do pixel em milímetros nas direções horizontal e vertical.

As influências óticas, na maioria dos casos, podem ser tratadas simplesmente como distorções radiais da seguinte forma (TRUCCO & VERRI, 1998):

$$x^c = x_d (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (16)$$

$$y^c = y_d (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (17)$$

sendo, (x_d, y_d) as coordenadas distorcidas dos pontos e $r^2 = x_d^2 + y_d^2$. Observa-se nas equações (16) e (17) que a distorção no centro da imagem é sempre nula e cresce conforme o afastamento do centro.

3.5.3 Coordenadas da imagem no mundo

Determinados os valores para os parâmetros intrínsecos e extrínsecos, pode-se relacionar diretamente o sistema de coordenadas da imagem com o do mundo, sem a necessidade de explicitar o sistema de coordenadas da câmera (ZHANG, 2000). Desta forma, substituindo-se as equações (12) a (15) em (11) tem-se que:

$$x^{im} - o_x = -f_x \frac{r_{11}X^m + r_{12}Y^m + r_{13}Z^m + T_x}{r_{31}X^m + r_{32}Y^m + r_{33}Z^m + T_z} \quad (18)$$

$$y^{im} - o_y = -f_y \frac{r_{11}X^m + r_{12}Y^m + r_{13}Z^m + T_y}{r_{31}X^m + r_{32}Y^m + r_{33}Z^m + T_z} \quad (19)$$

onde, $f_x = \frac{f}{s_x}$ e $f_y = \frac{f}{s_y}$.

Como as equações (18) e (19) possuem um mesmo denominador, pode-se assumir para cada par de pontos $((X_i^{im}, Y_i^{im}, Z_i^{im}), (x_i^{im}, y_i^{im}))$ a equação (ZHANG, 2000):

$$\begin{aligned} (x_i^{im} - o_x) f_y (r_{21}X_i^m + r_{22}Y_i^m + r_{23}Z_i^m + T_y) \\ = (y_i^{im} - o_y) f_x (r_{11}X_i^m + r_{12}Y_i^m + r_{13}Z_i^m + T_y) \end{aligned} \quad (20)$$

Generalizando, podem-se considerar as coordenadas transladadas $(x_i^{im}-o_x, y_i^{im}-o_y) = (x_i^{im}, y_i^{im})$, considerando que a origem das coordenadas da imagem está no ponto (0,0) e $\alpha = f_x/f_y$, a equação (20) pode ser representada como uma equação linear de 8 coeficientes desconhecidos, como representado na equação 21 (ZHANG, 2000):

$$\begin{aligned} x_i^{im} X_i^m v_1 + x_i^{im} Y_i^m v_2 + x_i^{im} Z_i^m v_3 + x_i^{im} v_4 - \\ y_i^{im} X_i^m v_5 + y_i^{im} Y_i^m v_6 + y_i^{im} Z_i^m v_7 + y_i^{im} v_8 = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

onde:

$$\begin{aligned} v_1 &= r_{21} & v_5 &= \alpha r_{11} \\ v_2 &= r_{22} & v_6 &= \alpha r_{12} \\ v_3 &= r_{23} & v_7 &= \alpha r_{13} \\ v_4 &= T_y & v_8 &= \alpha T_x \end{aligned}$$

3.5.4 Calibração

Calibração da câmera é o processo para determinar os valores dos parâmetros referentes ao seu modelo. Aplicando a equação (21) para N pontos, cujas coordenadas do referencial do mundo $[X_i^m \ Y_i^m \ Z_i^m]$ e suas projeções $[x_i^m, y_i^m]$ na imagem são conhecidas, tem-se um sistema homogêneo de N equações lineares como (ZHANG, 2000):

$$A_v = 0 \quad (22)$$

onde, $v = [v_1, \dots, v_8]^T$ e a matriz A de dimensões $N \times 8$ é dada por:

$$A = \begin{bmatrix} x_1^{im} X_1^m & x_1^{im} Y_1^m & x_1^{im} Z_1^m & x_1^{im} & -y_1^{im} X_1^m & -y_1^{im} Y_1^m & -y_1^{im} Z_1^m & -y_1^{im} \\ x_2^{im} X_2^m & x_2^{im} Y_2^m & x_2^{im} Z_2^m & x_2^{im} & -y_2^{im} X_2^m & -y_2^{im} Y_2^m & -y_2^{im} Z_2^m & -y_2^{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N^{im} X_N^m & x_N^{im} Y_N^m & x_N^{im} Z_N^m & x_N^{im} & -y_N^{im} X_N^m & -y_N^{im} Y_N^m & -y_N^{im} Z_N^m & -y_N^{im} \end{bmatrix} \quad (23)$$

A solução do sistema linear homogêneo da equação (22) é dada pelo auto-vetor correspondente ao menor autovalor de $A^T A$ (FORSYTH & PONCE, 2003). Considerando que todos os parâmetros da câmera possuem um fator de escala γ , tem-se que $v = \bar{v}$ e que:

$$\bar{v} = \gamma (r_{21}, r_{22}, r_{23}, T_y, \alpha r_{11}, \alpha r_{12}, \alpha r_{13}, \alpha T_x) \quad (24)$$

Pelas propriedades da matriz de rotação, sabe-se que $r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2 = 1$, e a partir disso pode-se concluir que:

$$\sqrt{\bar{v}_1^2 + \bar{v}_2^2 + \bar{v}_3^2} = \sqrt{\gamma^2(r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2)} = |\gamma| \quad (25)$$

De forma similar, assumindo que $r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2 = 1$ e que $\alpha > 0$, tem-se que:

$$\sqrt{\bar{v}_1^2 + \bar{v}_2^2 + \bar{v}_3^2} = \sqrt{\gamma^2(r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2)} = \alpha|\gamma| \quad (26)$$

Até o momento foram determinadas as duas primeiras linhas da matriz de rotação, as componentes x e y do vetor de translação, bem como o fator de escala γ e o fator de forma α . Sabendo que a terceira linha da matriz de rotação pode ser determinada pelo produto vetorial entre as duas primeiras linhas, resta apenas determinar a componente z do vetor de translação e a distância focal na direção horizontal f_x .

Para determinar estes últimos parâmetros utilizam-se as equações (18) ou (19) e obtém-se a solução do sistema minimizando o erro quadrático de:

$$A \begin{pmatrix} T_z \\ f_x \end{pmatrix} = b \quad (27)$$

Utilizando os mesmos N pares de pontos, tem-se:

$$A = \begin{bmatrix} x_1^{im} & (r_{11}X_1^m + r_{12}Y_1^m + r_{13}Z_1^m + T_x) \\ x_2^{im} & (r_{11}X_2^m + r_{12}Y_2^m + r_{13}Z_2^m + T_x) \\ \vdots & \vdots \\ x_N^{im} & (r_{11}X_N^m + r_{12}Y_N^m + r_{13}Z_N^m + T_x) \end{bmatrix} \quad (28)$$

e

$$b = \begin{pmatrix} -x_1^{im}(r_{31}X_1^m + r_{32}Y_1^m + r_{33}Z_1^m) \\ -x_2^{im}(r_{31}X_2^m + r_{32}Y_2^m + r_{33}Z_2^m) \\ \vdots \\ -x_N^{im}(r_{31}X_N^m + r_{32}Y_N^m + r_{33}Z_N^m) \end{pmatrix} \quad (29)$$

Dessa forma, todos os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera são determinados: matriz de rotação $\mathbf{R}$, vetor de translação $\mathbf{T}$, distância focal nas direções horizontal e vertical f_x e f_y .

3.6 COR E PROFUNDIDADE

Uma característica do Kinect[®] é fornecer as informações de cor e profundidade separadamente e para relacioná-las, é necessário efetuar um cálculo adicional conhecido como calibração, registro ou triangulação (TEIXEIRA, 2011).

Apenas as imagens de profundidade, na maioria dos casos, já são suficientes para sistemas de rastreamento de movimentos ou detecção de colisão, mas em conjunto as imagens coloridas aumentam seu valor e utilidade. Entretanto, é necessário que essas imagens estejam alinhadas, isto é, um pixel da coordenada de profundidade deve estar exatamente referenciado ao pixel da coordenada da imagem colorida (TEIXEIRA, 2011).

A câmera de profundidade possui uma resolução de 640×480 pixels, 11 bits de sensibilidade e um ângulo de visão de $57^\circ \times 45^\circ$, enquanto a câmera RGB possui uma resolução de 640×480 pixels, 8 bits de sensibilidade e um ângulo de visão de $63^\circ \times 50^\circ$. Apesar da equivalência das imagens quanto à resolução em pixels, há uma pequena diferença nos ângulos focais das câmeras. Esta diferença resulta em uma distorção ao tentar-se simplesmente sobrepor as duas imagens, causando um efeito de sobreposição devido ao tamanho reduzido dos objetos em uma das imagens em relação à outra. Outro fator relevante é a distância das câmeras posicionadas no sensor. Há uma distância de 2,5 cm entre a posição da câmera IR em relação à câmera RGB. Esta distância resulta em uma diferença natural no ângulo de captura das imagens de um mesmo objeto, causando um efeito de deslocamento ao tentar-se a sobreposição (Figura 16) (PRIMESENSE, 2011).

Para solucionar essas diferenças e obter uma relação entre os sensores de profundidade e RGB é preciso primeiramente efetuar um processo de calibração para as imagens de cada sensor. Este processo será detalhado na próxima seção.

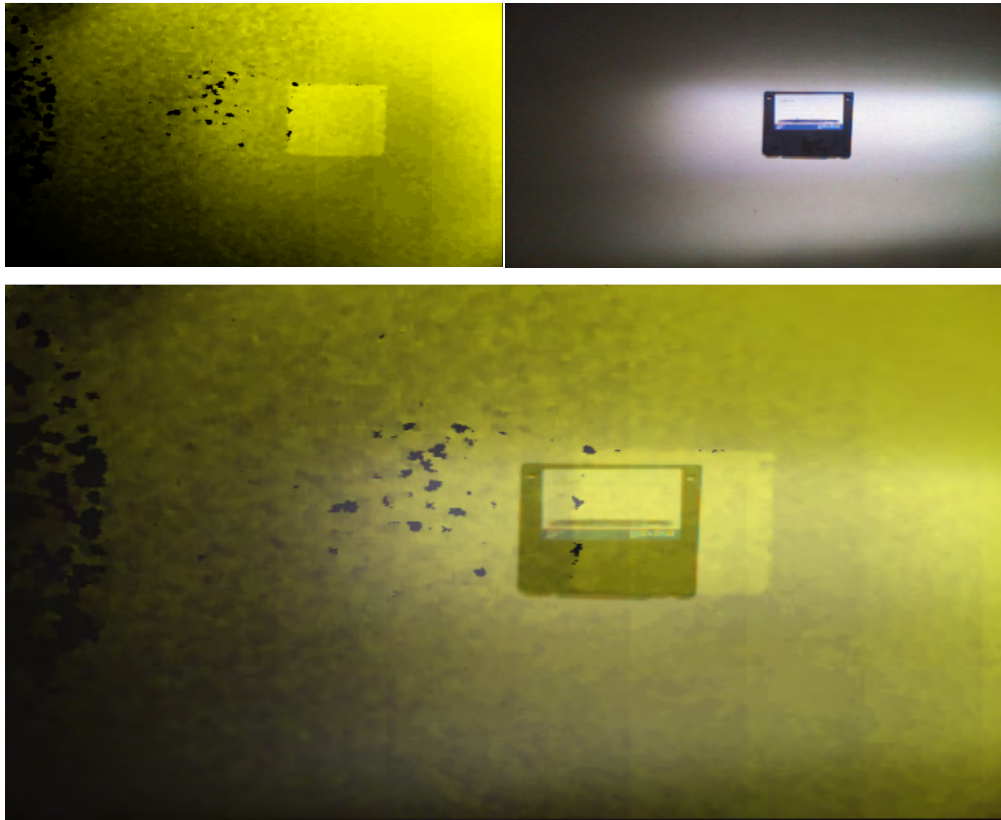


Figura 16 - Imagem IR (sup. Esquerdo) e RGB (sup. Direito);
Imagem IR+RGB sobrepostas pixel a pixel (Inferior)

Depois de obtidos os parâmetros intrínsecos e extrínsecos de cada câmera por meio dos métodos conhecidos de calibração convencional, pode-se então reprojetar cada pixel da câmera de profundidade no espaço 3D métrico da seguinte forma:

$$\begin{cases} Z_{p3d} = Z_{xp,yp} \\ X_{p3d} = (x_p - cx_p) * Z_{p3d} / fx_p \\ Y_{p3d} = (y_p - cy_p) * Z_{p3d} / fy_p \end{cases} \quad (30)$$

onde, x_p, y_p são as coordenadas de cada ponto em pixels; $Z_{xp,yp}$ é a profundidade do ponto x_p, y_p em metros; cx_p, cy_p, fx_p, fy_p são os parâmetros intrínsecos da profundidade da câmera; $Z_{p3d}, X_{p3d}, Y_{p3d}$ são as coordenadas 3D resultantes do cálculo. Obtidos os pontos 3D (mundo), eles podem ser transformados para coordenadas do sensor RGB. Aplicando-se a equação (11), tem-se a seguinte transformação:

$$\begin{bmatrix} X'_{p3d} \\ Y'_{p3d} \\ Z'_{p3d} \end{bmatrix} = R * \begin{bmatrix} X_{p3d} \\ Y_{p3d} \\ Z_{p3d} \end{bmatrix} + T \quad (31)$$

onde, X'_{p3d} , Y'_{p3d} , Z'_{p3d} são as coordenadas mundo dos pixels para o sensor RGB, e R e T os parâmetros de rotação e translação obtidos no processo de calibração estéreo.

Para encontrar os valores de cor correspondente para os pixels em coordenadas 2D, deve-se reprojeter os pontos X'_{p3d} , Y'_{p3d} , Z'_{p3d} para a imagem RGB efetuando a seguinte transformação:

$$\begin{cases} x_{c2d} = (X'_{p3d} * fx_c / Z'_{p3d}) + cx_c \\ y_{c2d} = (Y'_{p3d} * fy_c / Z'_{p3d}) + cy_c \end{cases} \quad (32)$$

onde, x_{c2d} , y_{c2d} é a coordenada na imagem RGB com a cor referente à posição do pixel da imagem IR que contém a profundidade; e fx_c , fy_c , cx_c , cy_c são os parâmetros intrínsecos da câmera RGB.

3.7 CALIBRAÇÃO DO KINECT®

Para obter a informação simultânea da imagem colorida e da profundidade, é essencial conhecer os parâmetros de calibração de ambas as câmeras, isto é, os parâmetros intrínsecos de cada uma, e rotação e translação relativa das duas câmeras.

O método de calibração de uma única câmera colorida é conhecido e diversos métodos podem ser aplicados para detectar seus parâmetros. Um exemplo é o software gratuito GML desenvolvido pela universidade de Moscou (VEZHNEVETS et al, 2011) que, por meio de imagens de um tabuleiro de xadrez, detecta e calcula os parâmetros da câmera que as obteve.

O processo de calibração conjunta de imagens coloridas e de profundidade é novo e apresenta algumas dificuldades. Os pontos chave para a calibração de uma câmera colorida são, normalmente, cantos de uma estrutura plana, os quais são indistinguíveis em uma imagem de profundidade. Os pontos de fronteira, facilmente distinguíveis em câmeras de profundidade, não são muito confiáveis, como mostra a Figura 17 (COSTA, 2011).

O método de calibração utilizado no presente estudo teve por base a calibração estéreo, a qual foi testada por Ros (2011). No método estéreo, as câmeras são calibradas como

um todo. Outro método alternativo foi apresentado por Costa (2011) que utilizou uma calibração independente para cada uma das câmeras, ambas com resultados muito semelhantes. Os resultados dos dois métodos permitem juntar em uma só imagem as informações de cor e profundidade. Contudo, o método de calibração de Ros (2011) mostrou-se mais simples.

Os dois modos de calibração podem ser utilizados por meio do método de Zhang (2012) que se encontra implementado na biblioteca OpenCV (Open Source Computer Vision) em aplicações desenvolvidas em C++ e Matlab, entre outras.

O processo de calibração consiste em obter uma sequência do par de imagens em diferentes ângulos. Numa primeira fase, cada par de imagens capturado é processado com o objetivo de encontrar a posição dos cantos interiores que constituem o padrão do xadrez, isto é, os pontos centrais que resultam da interseção de quatro quadrados para a câmera colorida e as bordas na câmera de IR (Figura 18).

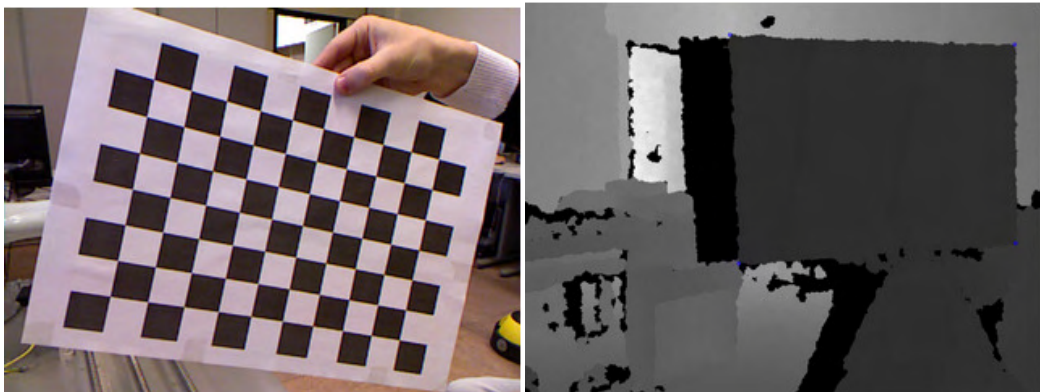


Figura 17 - Imagem Colorida (esquerda) e IR (direita)

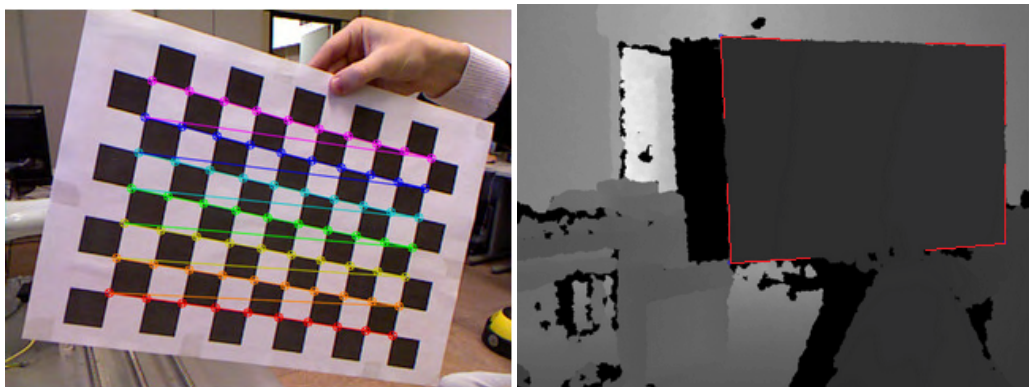


Figura 18 - Detecção dos pontos do tabuleiro de xadrez.

Na sequência, é realizada a parametrização do modelo de câmara e calculada a rotação e a posição relativa de ambos os sensores. Este processamento é concretizado recorrendo ao algoritmo de Zhang (2012), tendo como base de cálculo todos os pontos guardados na etapa anterior. Aqui, o algoritmo computa sequencialmente os parâmetros de cada sensor, dando origem à matriz de cada câmara, colorida e infravermelha, usando para cada uma, as coordenadas dos pontos da imagem correspondente. Os parâmetros retornados incluem as distâncias focais, os centros óticos e os coeficientes de distorção. Esses dados são utilizados para calcular os parâmetros extrínsecos por meio de uma calibração estereoscópica, que resulta na matriz de rotação e translação relativas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os métodos utilizados para obter as imagens e efetuar os cálculos da massa de fertilizantes adicionada a uma superfície plana serão descritos a seguir. Por se tratar de uma nova abordagem aplicada ao problema, foi necessário o desenvolvimento de um sistema para obtenção dos dados e estudos das limitações do sensor, além de aplicações e adaptações de técnicas de visão computacional para superá-las. Para validação do sistema foram realizados alguns experimentos para testar a precisão e a capacidade de obtenção de leituras de diferentes fertilizantes e, por fim, uma simulação de aplicação em esteira.

A técnica baseou-se em armazenar a distância inicial de cada pixel em relação ao sensor, utilizando os referenciais da área de trabalho (Figura 19), e detectar nos próximos quadros (*frames*) obtidos, as mudanças nas distâncias. Considerando as mudanças como um objeto adicionado, para cada pixel com alteração na distância para mais próximo ao sensor em relação ao pixel de referência da superfície inicial, calculou-se a área e volume do pixel em medidas do mundo real. Sabendo a densidade do material aplicado, determinou-se a massa (M) por meio da formula:

$$M = V * D \quad (33)$$

onde, V é o volume calculado pelas dimensões do mundo real do pixel e D é a densidade relativa do material.

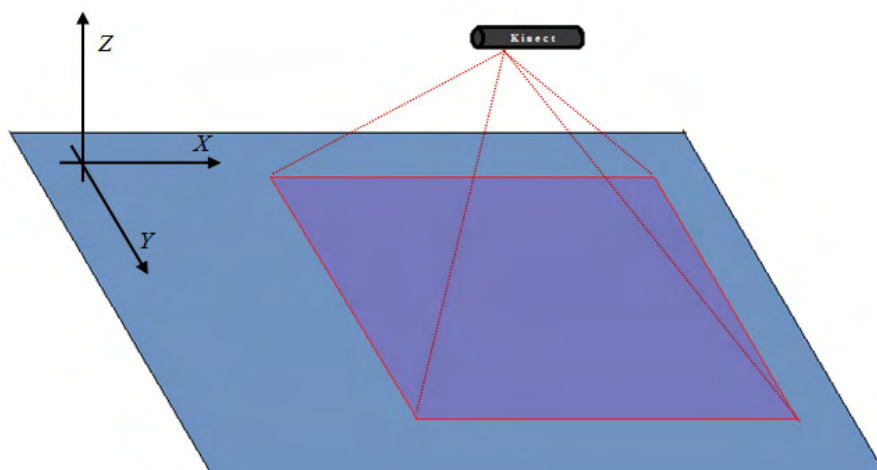


Figura 19 - Referenciais da área de trabalho.

Adicionalmente utilizou-se o recurso da câmera RGB para detectar a cor dos materiais medidos pelo sensor e calcular o percentual da mistura aparente.

Essas informações podem servir de base para comparar as quantidades reais aplicadas por sistemas de distribuição e suas regulagens, bem como para avaliar a capacidade de manter a homogeneidade nas misturas de fertilizantes.

4.1 EQUIPAMENTOS E CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS

Para o desenvolvimento da “ferramenta” e execução dos experimentos foram utilizados os seguintes equipamentos e configurações:

- Notebook HP Core I3, 4GB de memória RAM, 320 Gb de disco rígido;
- Sistema operacional Windows 7;
- Microsoft Visual Studio 2010, linguagem C++;
- Biblioteca OpenNI (Kinect[®] *open source*);
- Biblioteca Microsoft SDK (*Software Development Kit*);
- Biblioteca OpenCV (Visão computacional C++ *open source*);
- Sensor Kinect[®] for Windows;
- Iluminação por barras de LED modelo LL3148A-WHI. Fabricante *Advanced Illumination*;
- Difusor de LED modelo EL151 - DL51120. Fabricante *Advanced Illumination*;
- Interface de controle de iluminação CS410. Fabricante *Advanced Illumination*;

Para utilização do Kinect[®] conectado ao PC com o modelo do sensor para o Xbox 360, foi utilizado o roteiro de instalação, *drivers* e bibliotecas disponibilizadas pela OpenNI (OpenNI, 2011). Destaca-se que para o correto funcionamento do sensor conectado ao PC é essencial seguir corretamente a ordem de instalação recomendada, iniciando-se pelas bibliotecas do OpenNI, depois pelos *drivers* do Kinect[®] da OpenNI e, finalmente, pelos *drivers* PrimeSense NITE.

Um fator importante que interfere na qualidade do resultado é a obtenção de leituras com distâncias mais próximas possíveis do objeto ou material. Esta proximidade melhora a qualidade das imagens coloridas e proporciona uma área de pixel menor no mundo real, isto é, um maior número de pixels ocupando o objeto ou material detectado nas imagens de profundidade.

O sensor Kinect[®] Xbox possui uma limitação de distância de proximidade de 60 cm. Distâncias menores em relação ao sensor simplesmente não são calculadas e apresentam valores de disparidade igual a zero. Por este fato, a utilização do sensor Kinect[®] para Windows mostrou-se mais adequado, pois permite a leitura de distâncias a partir de 40 cm do sensor.

Um inconveniente na utilização do sensor Kinect[®] para Windows é o fato de as bibliotecas OpenNI ainda não estarem preparadas para a opção “modo perto”, presente no novo sensor. Para superar este inconveniente, foi utilizado um recurso desenvolvido por Tomodo (2012), que faz uma ponte entre as bibliotecas da Microsoft SDK e as da OpenNI. A ponte desenvolvida por Tomodo (2012) permite a utilização dos drivers simultaneamente, o que não era possível até então, fazendo com que o OpenNI reconheça a ativação do “modo perto” e passe a receber os valores de disparidade das distâncias a partir de 40 cm.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

O software foi desenvolvido na linguagem C++ utilizando o compilador Microsoft Visual Studio 2010 Ultimate para plataforma Windows 7, 64 bits. Para leitura dos dados do Kinect[®] foram utilizados os *frameworks* da biblioteca OpenNI e, para o tratamento das imagens, foram utilizados os recursos desenvolvidos na biblioteca OpenCV.

O sistema foi planejado para ler cada quadro (*frame*) do Kinect[®], efetuar as correções, transformações e cálculos para, no final do ciclo, mostrar e gravar os resultados para análise.

Ao completar o processo, o sistema retoma o ciclo calculando as informações para cada *frame*, permitindo, desta forma, que os materiais passem na frente do sensor podendo ser conduzidos por uma esteira, por exemplo. A Figura 20 mostra os diferentes processos do sistema efetuados para cada ciclo.

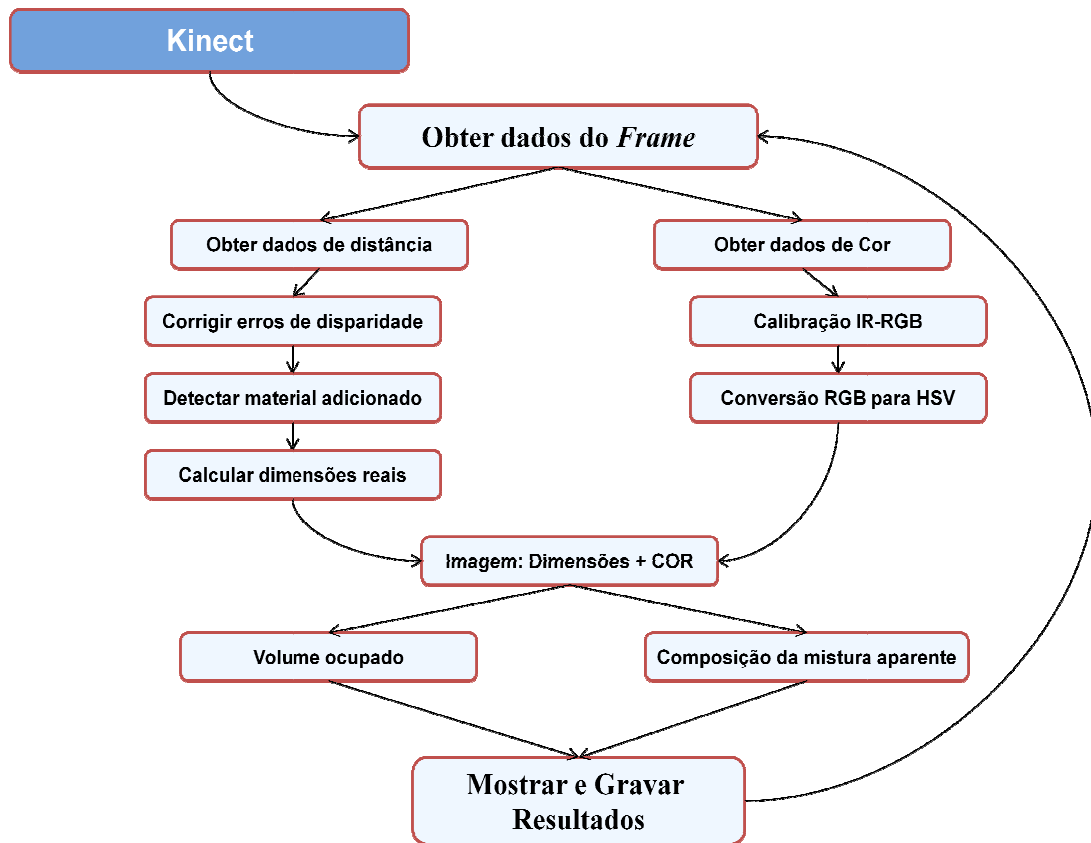


Figura 20 - Ciclo e procedimentos do sistema

Para conduzir os experimentos, analisar e facilitar a compreensão das leituras obtidas pelo Kinect[®], o sistema mostra duas imagens, uma para o sensor IR e outra para o sensor RGB, e outra tela com as informações calculadas pelo sensor.

Para cada quadro (*frame*), os dados de IR são fornecidos pelo sensor por meio de um ponteiro iniciando pelo pixel 0,0 até a última posição 639,479, num total de 307.200 pixels, com valores de distância em milímetros ou um valor de disparidade.

Para obter as imagens de IR é necessário criar, a partir das informações recebidas do sensor, um padrão de cores proporcional à distância medida.

A imagem IR criada é uma representação monocromática com variação de tons representando um histograma criado a partir das distâncias. A Figura 21, a partir de um *frame* lido do sensor, mostra a imagem de distâncias de um plano a 46 cm do sensor e objetos de espessuras diferentes. O objeto mais claro abaixo possui dois milímetros de espessura; logo acima, um objeto alongado com dez milímetros e, ao lado direito da imagem, objetos sobrepostos com dez milímetros e vinte milímetros. Todos os objetos totalmente perceptíveis na imagem.

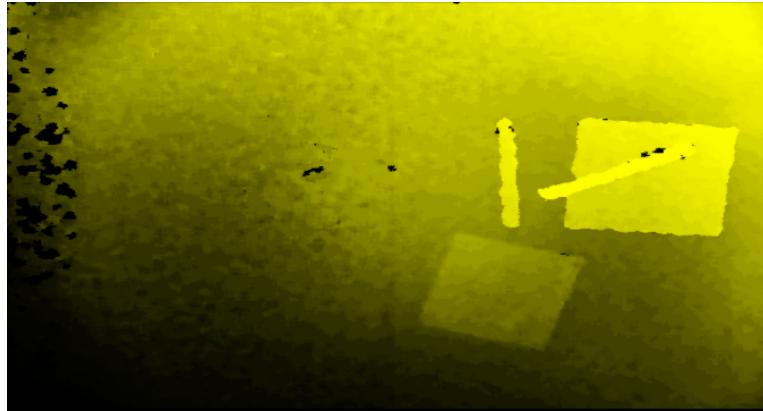


Figura 21 - Imagem IR criada pelo histograma das distâncias

Da mesma forma, para cada quadro (*frame*), os dados da imagem colorida também são fornecidos por um ponteiro com 307.200 pixels com os dados das cores RGB separados. Na Figura 22, a imagem é gerada a partir dos valores de RGB do ponteiro para cada pixel.



Figura 22 - Imagem padrão RGB

Nas próximas subseções serão detalhados os processos mostrados na Figura 20, alguns deles, resultados de experimentos que auxiliaram a desenvolver o método aplicado neste trabalho.

4.2.1 Corrigindo erros de disparidade

Nas imagens geradas a partir dos valores da distância obtidas pelo sensor IR, os pixels com valores de disparidade nulos, isto é, sem valor de distância, propositadamente neste trabalho, foram “pintados” com a cor preta. Estas falhas podem ocorrer em um único pixel, às

vezes imperceptível, ou até em inúmeros pixels em diversas regiões, criando uma forma de erosão na imagem. Como mostrado na Figura 23, nas áreas circundadas em vermelho, há manchas que serão chamadas de erosões. Estas erosões são consequências de fatores do ambiente, como excesso de iluminação, solar ou artificial, ou da superfície de materiais muito reflexivos.



Figura 23 - Imagem IR com erosões

O tratamento dessas falhas é um fator relevante para garantia dos resultados. Para contornar este problema, foram utilizados dois métodos:

- a. redução da área de leitura de acordo com as características das dimensões dos materiais medidos;
- b. reconstrução da área da erosão, quando esta estava na região do material detectado.

A redução da área de captura consiste em utilizar apenas uma região específica da imagem de IR para a detecção de objetos ou materiais. Esta solução é compatível com a necessidade do experimento, sendo que a aplicação de fertilizantes em linhas ocupa uma largura de poucos centímetros para depositar os materiais. Um experimento simples para comprovar a eficácia do método foi realizado comparando toda a área de captura da imagem IR com uma pequena área em uma região de pouca interferência. A Figura 24 mostra a região reduzida de captura e a Tabela 2 mostra a quantidade de pixel da imagem, quantidade de pixel da área selecionada e o percentual de pixel perdido no *frame*, isto é, sem valor de distância. A área do quadro nesta imagem representa $84,6 \text{ cm}^2$ a uma distância de 46 cm do sensor.

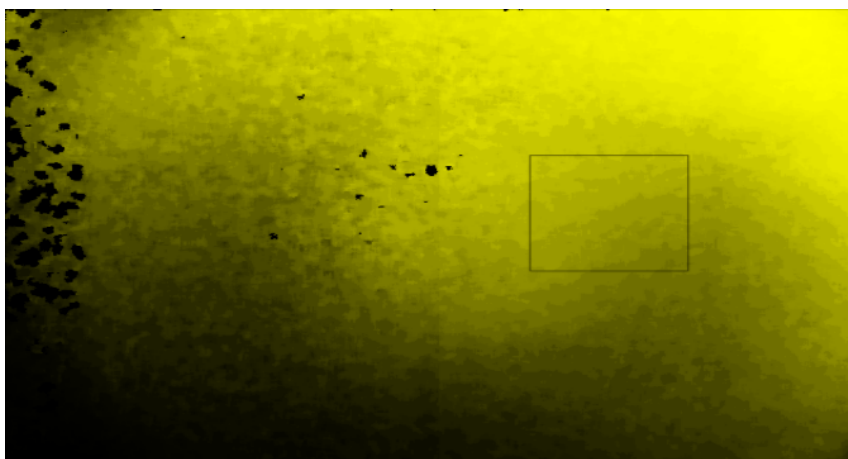


Figura 24 -Imagem IR com quadro de captura reduzido

Tabela 2 - Total de pixels sem valor de distância.

Total de Pixels da Imagem	Erosão Total (pixel)	%	Total de Pixels do Quadro	Erosão do Quadro (pixel)	%
307200	8448	2	13800	0	0
307200	9085	2	13800	0	0
307200	7959	2	13800	0	0
307200	9702	3	13800	0	0
307200	9832	3	13800	0	0
307200	8911	2	13800	0	0
307200	8127	2	13800	0	0
307200	8060	2	13800	0	0
307200	8025	2	13800	0	0
307200	8499	2	13800	0	0
307200	7652	2	13800	0	0

A técnica de reconstrução da área de erosão é aplicada dentro dos limites da área de captura para recomposição de pixels perdidos, isto é, sem valor de distância. Essa técnica é baseada em recuperar o valor da distancia do pixel por interpolação pelo vizinho mais próximo.

A interpolação pelo vizinho mais próximo é um método de interpolação determinista no qual o valor estimado é sempre igual à sua amostra mais próxima, não considerando qualquer outra. Dada a sua simplicidade, é um método regularmente utilizado para interpolações rápidas e em áreas de estudo bem amostradas. Nesse caso, para cada localização do pixel a ser interpolada é calculada a distância de todos os pixels vizinhos à essa mesma

localização, e determinado qual deles terá a distância mínima, sendo o seu valor correspondente à interpolação.

No experimento realizado colocou-se um objeto com superfície reflexiva na área de captura para, propositadamente, causar erosões nas imagens e forçar a reconstrução das áreas afetadas. O sensor ficou posicionado a uma distância de 46 cm do plano de referência. Para comprovação dos resultados foram obtidas 20 leituras com a quantidade de pixels reconstruídos, a imagem original com erosões e a nova imagem corrigida.

4.2.2 Detectando o material adicionado

Estabelecida a área de captura compatível com a área de espalhamento do material a ser detectado com as devidas correções, o próximo passo foi armazenar uma referência de plano. Esta referência não necessariamente deve ser plana, pois cada pixel armazenado conterá a distância em relação ao sensor. A técnica de detecção consiste em comparar, após a captura da referência, cada pixel do quadro armazenado com os próximos quadros recebidos do sensor Kinect[®]. As diferenças nas distâncias acima do plano de referência, isto é mais próximas do sensor, são entendidas como um material adicionado e dispara os processos de cálculos para cada quadro.

Um dado importante é saber se há variações nas leituras do sensor e se estas variações são relevantes para afetar a precisão dos cálculos.

Para testar a ocorrência de variação nas leituras de distâncias obtidas pelo sensor, foi realizado um experimento de comparação do plano de referência com uma sequência de leituras do mesmo plano. Tendo-se armazenado o plano de referência (*background*), a cada próximo quadro, todos os pixels detectados como novos objetos foram armazenados em um ponteiro contendo as informações tridimensionais da sua posição em pixel na imagem e sua distância em milímetros.

4.2.3 Cálculo das dimensões e volume

Detectados todos os pixels do material adicionado acima do plano de referência, o próximo passo foi estabelecer as suas dimensões, isto é, as dimensões de cada pixel.

O método utilizado consistiu em calcular o tamanho do pixel no mundo real, isto é, estabelecer a área em milímetros quadrados que um pixel consegue armazenar informações de um determinado local da imagem.

No capítulo 3 foi mostrado como obter as medidas no mundo real, tendo-se a posição do pixel $P(x_d, y_d)$ e os parâmetros de calibração da câmera IR, e aplicá-las à equação (34). O resultado desta equação posiciona cada pixel a uma distância do centro focal da câmera, como mostra a Figura 25. O valor de X_{p3d} é a distância em metros de x_d até o eixo vertical cx_d , e Y_{p3d} é a distância em metros de y_d até o eixo horizontal cy_d . O sinal resultante de cada operação (positivo ou negativo) indica em qual quadrante o pixel está posicionado. Dessa forma, os valores de X_{p3d} negativos ou positivos, indicam que o pixel está localizado do lado esquerdo ou direito do ponto central, e os valores de Y_{p3d} positivos ou negativos, indicam se o pixel está acima ou abaixo do ponto central.

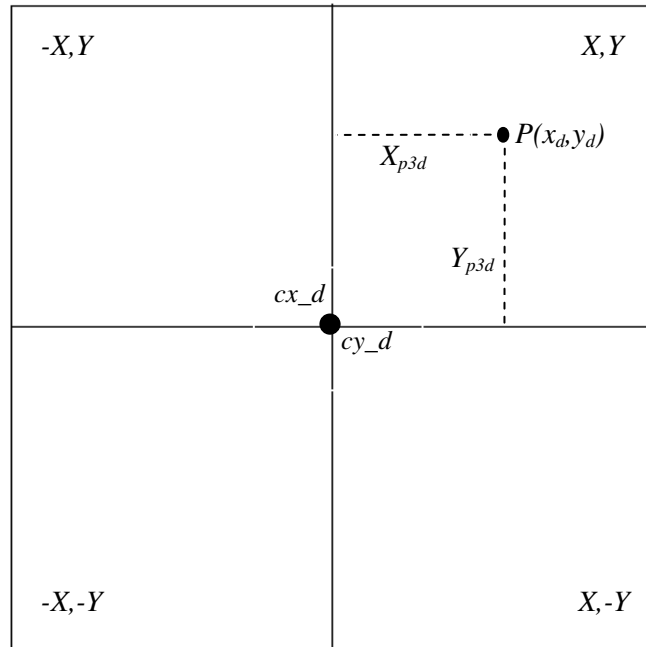


Figura 25 - Distância do pixel em relação ao centro focal

Para obter a área ocupada de cada pixel, é preciso calcular as suas medidas de altura e largura, isto é, seu comprimento no eixo cx_d e eixo cy_d . Esta medida é calculada por meio da distância euclidiana do pixel em relação aos seus vizinhos. Assim, cada pixel $P(x_d, y_d)$ com suas distâncias X_P , Y_P , dos eixos centrais cx_d, cy_d , é medido em relação aos seus vizinho no eixo x $E(x_d+1, y_d)$ e $D(x_d-1, y_d)$ e eixo y $C(x_d, y_d+1)$ e $B(x_d, y_d-1)$. Desta forma tem-se que:

$$\begin{aligned}
 l &= \frac{\sqrt{(X_P - X_D)^2} + \sqrt{(X_P - X_E)^2}}{2} \\
 h &= \frac{\sqrt{(Y_P - Y_C)^2} + \sqrt{(Y_P - Y_B)^2}}{2}
 \end{aligned} \tag{34}$$

e,

$$A = l * h \tag{35}$$

onde, A é a área resultante de cada pixel calculado.

O cálculo individual para cada pixel é necessário para compensar pequenos efeitos de distorção radial e de profundidade que resultam em diferentes áreas (A) para o pixel nas regiões da imagem.

O volume é calculado pelo produto da área e a profundidade de cada pixel no ponteiro em relação ao plano de referência. Dessa forma, tem-se:

$$v = A * prof(xd, yd) \tag{36}$$

onde, $prof(xd, yd)$ é a função que retorna a profundidade do ponto $P(x_d, y_d)$ até o plano de referência, isto é, a diferença de distância entre o ponto detectado pelo sensor e a distância armazenada da referência inicial.

O resultado desta operação é um ponteiro com o volume de material detectado no quadro de captura. Aplicando-se a equação (33) a este ponteiro tem-se a massa de material aplicada na área de captura.

4.2.4 Calibração IR-RGB

O objetivo da calibração das duas câmeras do Kinect® foi obter uma imagem com quatro dimensões, isto é, além das três dimensões no mundo real, também a cor de cada pixel.

O método de calibração utilizado foi explicado no capítulo 3.7, sendo aplicado para gerar um ponteiro com dados de referência em milímetros e a cor de cada pixel dentro do quadro de captura.

O quadro de captura foi definido por variáveis no sistema que podem ser configuradas no início da sua execução. Desta forma, a distância e a superfície utilizadas podem ser

ajustadas ao ambiente. Estes limites foram definidos por x_b, y_i a x_f, y_f do sistema de coordenadas de pixels.

Os valores das posições da câmera RGB foram retornados por uma função que efetua os cálculos das equações (35) e (36) utilizando os parâmetros intrínsecos e extrínsecos resultantes da calibração do sensor. Dessa maneira, cada pixel do quadro de captura foi calibrado, executando-se a função ***CalibraIRtoRGB(X_{ir}, Y_{ir}, Z_{ir})*** que retorna duas variáveis (X_{rgb}, Y_{rgb}), onde X_{ir}, Y_{ir}, Z_{ir} são as coordenadas e profundidade da posição do pixel na câmera IR, e X_{rgb}, Y_{rgb} as posições equivalentes da câmera RGB.

4.2.5 Conversão RGB-HSV

Uma proposta adicional ao experimento foi identificar a composição da mistura aparente do material aplicado por meio da cor. Essa identificação pode ser obtida da cor natural do produto ou mesmo por processo de coloração artificial dos materiais aplicados aos testes. A identificação de cores apresenta algumas dificuldades resultantes do sistema de cores utilizados nas imagens obtidas da câmera do Kinect®.

As imagens obtidas pelo Kinect® utilizam o padrão RGB de cores, que é o mais difundido e utilizado em monitores de computadores e TVs. O modelo de cores RGB é um modelo aditivo no qual o vermelho, o verde e o azul (usados em modelos aditivos de luzes) são combinados de várias maneiras para reproduzir outras cores. Cada canal R, G, B (vermelho, verde e azul) variam entre 0 e 255. A combinação entre as variações de cada canal resulta na cor e tonalidade, desde o preto (0.0.0) até o totalmente branco (255.255.255).

Apesar de ser possível a utilização do padrão RGB para identificação das cores, o método torna-se difícil neste experimento em decorrência das variações de iluminação do ambiente.

O padrão de cores HSV (Figura 26) é a abreviatura para o sistema de cores formadas pelas componentes *hue* (matiz), *saturation* (saturação) e *value* (valor) que representa o brilho. Este sistema de cores define o espaço de cor utilizando seus três parâmetros.

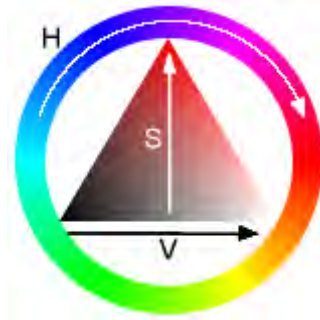


Figura 26 - Padrão de cores HSV

A matiz H (tonalidade) indica o tipo de cor, abrangendo todas as cores do espectro, desde o vermelho até o violeta, mais o magenta. Atinge valores de 0 a 360, mas para algumas aplicações, esse valor é normalizado de 0 a 100%.

A saturação S, também chamada de "pureza", varia entre 0 a 100%. Quanto menor for esse valor, mais tom de cinza aparecerá na imagem, e quanto maior for esse valor, mais "pura" será a imagem.

O valor V (brilho) define o brilho da cor, e também atinge valores de 0 a 100%.

Neste trabalho, a utilização do padrão HSV se mostrou adequado, pois identifica a cor apenas com uma variável (H). Essa identificação facilita e aumenta a precisão, pois independentemente das variações de brilho (V) ou saturação (S) que acontecem naturalmente por fatores do ambiente ou mesmo do material, a cor será a mesma.

O ponteiro resultante da calibração IR-RGB e redimensionamento foi convertido para o padrão HSV, utilizando uma função da biblioteca OpenCV chamada *CvCvtColor* na linguagem C++.

O sistema foi configurado para obter as cores de cada material utilizado antes do experimento e armazená-las em variável para comparações no decorrer da execução pelo modelo HSV.

4.3 EXPERIMENTO PARA VALIDAÇÃO

Nesta seção será apresentado o experimento para validação do sistema de medição dos dados obtidos do sensor Kinect[®] e calculados pelo sistema.

Para aferir as leituras foram executadas medições de objetos com forma e tamanho conhecidos para estabelecer o nível de acerto dos valores calculados comparados com as dimensões reais dos objetos.

Foram utilizados 12 cubos de madeira com medidas de 10 mm de largura $\times$ 10 mm de altura e 10 mm de profundidade, numerados de 1 a 12, com uma das superfícies coloridas, sendo 4 vermelhas, 4 azuis e 4 verdes. Cada cubo foi pesado em uma balança de precisão modelo Marte AL500C e calculada sua densidade conforme a Tabela 3. Para o cálculo de medidas com o conjunto de cubos, utilizou-se a densidade média. Não foi utilizado um valor único de densidade absoluta da madeira, pois essa pode variar por diversos fatores como a umidade ou local de extração (BRASIL et al., 1979).

Na primeira medição foi escolhido um único cubo, aleatoriamente entre o conjunto. O sensor foi posicionado a uma altura de 42,5 cm de uma superfície plana e com baixa refletância de luz. Obteve-se uma sequência de leituras dos quadros (*frames*), sendo descartados os intervalos com movimentos de colocação ou retirada do objeto. O tamanho do quadro de captura foi definido em 13.800 pixels.

Tabela 3 - Medidas dos objetos

Cubo	Cor	Massa(g)	Volume (mm ³)	Densidade g/cm ³
1	Azul	0,502	1000	0,502
2	Azul	0,446	1000	0,446
3	Azul	0,590	1000	0,590
4	Azul	0,591	1000	0,591
5	Verde	0,615	1000	0,615
6	Verde	0,443	1000	0,443
7	Verde	0,547	1000	0,547
8	Verde	0,591	1000	0,591
9	Vermelho	0,578	1000	0,578
10	Vermelho	0,564	1000	0,564
11	Vermelho	0,639	1000	0,639
12	Vermelho	0,503	1000	0,503
Densidade Media				0,571

O experimento foi realizado com e sem iluminação, com 20 repetições. Três variações foram submetidas aos testes: um único cubo, 3 cubos de cores diferentes e 12 cubos. Para os testes com iluminação foram utilizados uma barra de LED direcional e um difusor. Os valores resultantes dos testes com e sem iluminação foram submetidos ao teste *t* com 95% de confiança em cada uma das três variações.

A iluminação foi posicionada à distância de 42 cm do plano de referência e regulada a 100% da potência. As imagens da primeira variação estão representadas na Figura 27; em

primeiro a obtenção do plano de referência e, na sequência, o objeto iluminado e sem iluminação. Foi utilizado o cubo de número 9, escolhido de forma aleatória.

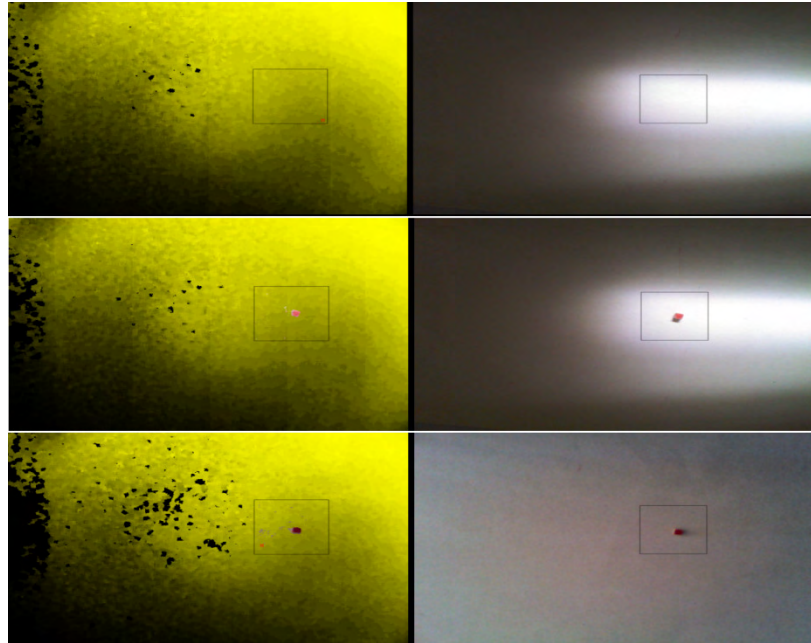


Figura 27 - Imagens da captura - 1ª: plano de referência; 2ª: objeto iluminado; 3ª: sem iluminação.

O segundo experimento foi realizado para um conjunto de três cubos de números 1, 7 e 9, de cores azul, verde e vermelho, respectivamente (Figura 28). Foi considerado o valor de densidade média entre os três cubos para o cálculo da massa.



Figura 28 - Medição de 3 cubos

O terceiro experimento foi realizado com todo o conjunto de 12 cubos (Figura 29). Foi considerado o valor de densidade média entre os cubos para o cálculo da massa.

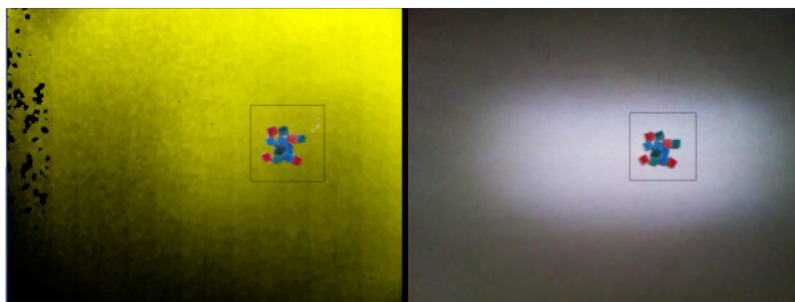


Figura 29 - Medição de 12 cubos

4.4 MEDIÇÃO DE FERTILIZANTES

O objetivo deste experimento foi observar o comportamento e a capacidade do sensor em medir diferentes matérias primas de fertilizantes. As amostras foram obtidas de produtos comercializados no mercado e dentro dos padrões e normas exigidas pelo Ministério da Agricultura. A Tabela 4 mostra as características de cada fertilizante utilizado no estudo. Os dados foram obtidos em laboratório, efetuando a pesagem de cada amostra em uma balança de precisão modelo Marte AL500C, e medindo seu volume e densidade pelo deslocamento de água em uma proveta.

Tabela 4 - Amostras de fertilizantes utilizados no experimento.

Fertilizante	Massa g	Volume cm ³	Densidade Relativa g/cm ³
Superfosfato triplo (SFT)	33,56	15,94	2,106
Cloreto de potássio (KCl)	33,28	18,01	1,848
Sulfato de amônio (SAM)	31,02	18,43	1,683
FTE-BR 12	41,63	18,66	2,231
Formulação 07-11-09	40,54	22,95	1,766
Formulação 03-17-00 com óleo	30,64	14,90	2,057

O experimento foi realizado em ambiente controlado com iluminação por uma barra de LED direcional a 20% de potência, sendo a cor considerada não relevante para o teste. O sensor ficou posicionado a uma distância de 42,5 cm do plano de referência. Cada amostra foi submetida a 20 repetições de leitura. Após a leitura do plano de referência, as amostras foram acomodadas sobre uma folha de papel opaca e deslocadas até a posição de captura. As imagens das amostras dos fertilizantes estão apresentadas nas Figuras 30 a 35.

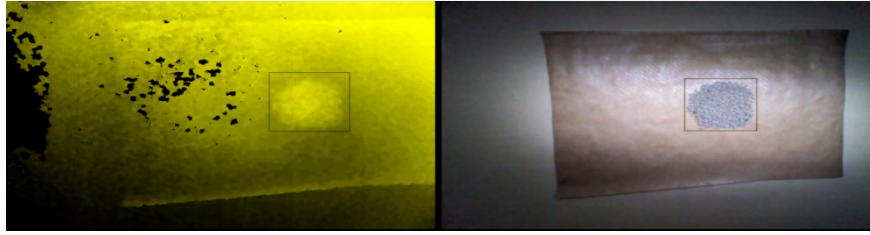


Figura 30 - Imagem da amostra de superfosfato triplo (SFT).

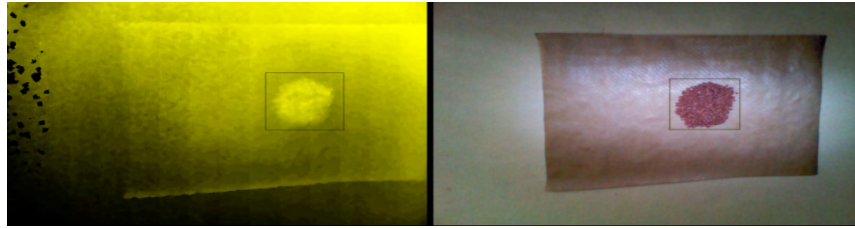


Figura 31 - Imagem da amostra de cloreto de potássio (KCl).



Figura 32 - Imagem da amostra de sulfato de amônio (SAM).



Figura 33 - Imagem da amostra de FTE-BR12.

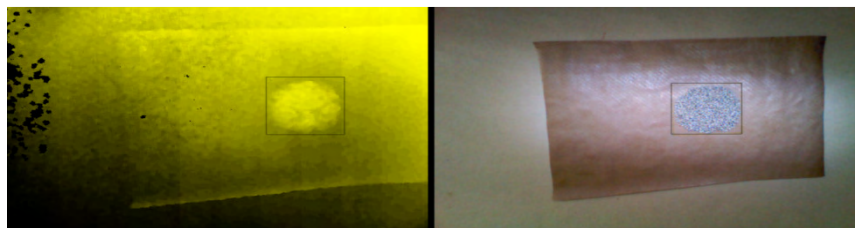


Figura 34 - Imagem da amostra da formulação 07-11-09.



Figura 35 - Imagem da amostra da formulação 03-17-00 com óleo.

4.5 EXPERIMENTO EM ESTEIRA

O experimento foi realizado com um equipamento simulador composto de duas esteiras, dois dosadores de rosca e dois motores, sendo um para o funcionamento da rosca do dosador e outro para movimentação da esteira, ambos movidos com bateria automotiva. O objetivo desse experimento foi obter leituras da massa de fertilizantes em movimento sobre a esteira, por meio da simulação da aplicação em linha.

Para medição foi utilizada uma barra de LED com iluminação a 20% da potência e o sensor Kinect[®] conectado a um notebook.

O sensor Kinect[®] ficou posicionado sobre o equipamento há distância de 43 cm, e a iluminação foi posicionada na mesma distância, paralela ao sensor e esteira.

O quadro de captura foi definido com 10 cm de largura por 8 cm de altura para adaptar-se à região da esteira onde o material ficou depositado. A região de leitura foi fixada próxima ao termino da esteira para evitar vibração (Figura 36). O fertilizante utilizado para esse estudo foi a formulação 03-17-00 com óleo.



Figura 36 - Esteira para simulação de aplicação de fertilizantes

Por se tratar de equipamento de demonstração, a esteira do simulador foi regulada na velocidade máxima de $0,5 \text{ km h}^{-1}$ e as dosagens reguladas ao mínimo de 4.000 kg ha^{-1} .

Para avaliar o comportamento das leituras, o experimento foi conduzido em duas situações. A primeira com o dosador *Fertisystem* ativo – sistema idealizado para evitar a ocorrência de pulsos durante a aplicação, e a segunda com esse dosador desativado. Durante o experimento foram coletadas duas amostras do fertilizante depositado na esteira para cada

condição (com o *Fertisystem* e sem o *Fertisystem*), referentes a 1 m de aplicação, as quais foram pesadas para comparação dos valores calculados pelo sistema. A balança utilizada foi a Marte AL500C.

Foram executadas três repetições e para cada repetição o sistema efetuou 412 leituras, equivalentes a 1236 quadros de passagem na esteira. As leituras foram intercaladas com e sem o dosador *Fertisystem*. As amostras para pesagem foram coletadas na última repetição.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos todos os resultados obtidos durante o trabalho de pesquisa e desenvolvimento da “ferramenta” para medir a regularidade na distribuição de fertilizantes sólidos por meio do sensor Kinect®. A maioria das funcionalidades embarcadas no sensor Kinect® foi planejada para jogos interativos em que não há necessidade de precisão ou detalhes milimétricos. Dessa forma, os métodos aplicados foram testados e cada resultado contribuiu para superar algumas limitações do sensor e evoluir no desenvolvimento do sistema de medição. Os resultados obtidos em cada etapa serão apresentados nas seções a seguir.

5.1 CALIBRAÇÃO

Comparando os resultados de calibração de dois sensores Kinect® com o resultado apresentado por Burrus (2011), apenas o sensor “*for Windows*” com a opção “*near mode*” apresentou resultado diferente dos parâmetros obtidos. Os valores retornados pela calibração são geralmente estáticos ou variam muito pouco para o sensor Kinect®. Isto pode ser consequência de um ótimo padrão de qualidade na construção do sensor. Os parâmetros e as matrizes dos valores intrínsecos resultantes da calibração para o Kinect® neste trabalho estão apresentados nas Tabela 6, e são referentes ao modelo do Kinect® para Windows. Inserindo os resultados das Tabelas 5 e 6 na forma como são representados, tem-se:

$$D = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ p_1 \\ p_2 \\ k_3 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

onde, para cada câmera teremos o vetor D com os coeficientes de distorção radial k e tangencial p e a matriz A , constituída pelas distâncias focais f e o centro ótico c .

Tabela 5 - Parâmetros retornados pela calibração da câmera RGB

Parâmetros da Camera RGB	
f_{x_rgb}	5.2921508098293293e+02
f_{y_rgb}	5.2556393630057437e+02
c_{x_rgb}	3.2894272028759258e+02
c_{y_rgb}	2.6748068171871557e+02
k_{1_rgb}	2.6451622333009589e-01
k_{2_rgb}	-8.3990749424620825e-01
p_{1_rgb}	-1.9922302173693159e-03
p_{2_rgb}	1.4371995932897616e-03
k_{3_rgb}	9.1192465078713847e-01

Tabela 6 - Parâmetros retornados pela calibração da câmera IR

Parâmetros da Camera IR	
f_{x_d}	5.9421434211923247e+02
f_{y_d}	5.9104053696870778e+02
c_{x_d}	3.1970780975300314e+02
c_{y_d}	2.6273913761751615e+02
k_{1_d}	-2.6386489753128833e-01
k_{2_d}	9.9966832163729757e-01
p_{1_d}	-7.6275862143610667e-04
p_{2_d}	5.0350940090814270e-03
k_{3_d}	-1.3053628089976321e+00

Considerando o resultado obtido da calibração de cada câmera, colorida e infravermelha, nota-se que o centro ótico obtido é diferente do centro da imagem em pixel. Para a resolução de 640×480 pixels, o centro é a posição 320, 240. Na imagem da câmera colorida, o centro ótico está localizado na posição 329×267 e, na de infravermelho, na posição 320×263 .

Nos parâmetros extrínsecos, tem-se como resultado as matrizes de rotação R e translação T , como segue:

$$R = \begin{bmatrix} 9.9984628826577793e^{-01} & 1.2635359098409581e^{-03} & -1.7487233004436643e^{-02} \\ -1.4779096108364480e^{-03} & 9.9992385683542895e^{-01} & -1.2251380107679535e^{-02} \\ 1.7470421412464927e^{-02} & 1.2275341476520762e^{-02} & 9.9977202419716948e^{-01} \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1.9985242312092553e^{-02} \\ -7.4423738761617583e^{-04} \\ 1.0916736334336222e^{-02} \end{bmatrix}$$

Aplicando os resultados obtidos pela calibração das Tabela 6, matriz de rotação R e translação T nas fórmulas (30), (31) e (32), e considerando na função $dist(x_d, y_d)$ o valor da distância atual do pixel retornada pelo Kinect[®] na posição projetada x_d, y_d da câmera IR, tem-se:

$$\begin{cases} Z_{p3d} = dist(x_d, y_d) \\ X_{p3d} = (x_d - cx_d) * dist(x, y) / fx_d \\ Y_{p3d} = (y_d - cy_d) * dist(x, y) / fy_d \end{cases} \quad (38)$$

onde, X_{p3d} , Y_{p3d} e Z_{p3d} é o ponto no espaço 3D métrico calculado a partir dos valores intrínsecos da câmera de profundidade, podendo-se então reprojetar este ponto para a câmera colorida aplicando a fórmula (31) e, em seguida, reprojetar as coordenadas 3D métrica da câmera coloria para as coordenadas 2D com as posições do pixel colorido com a fórmula 32:

$$\begin{bmatrix} X'_{p3d} \\ Y'_{p3d} \\ Z'_{p3d} \end{bmatrix} = R * \begin{bmatrix} X_{p3d} \\ Y_{p3d} \\ Z_{p3d} \end{bmatrix} + T \quad (39)$$

$$\begin{cases} x_c = (X'_{p3d} * fx_rgb / Z'_{p3d}) + cx_rgb \\ y_c = (Y'_{p3d} * fy_rgb / Z'_{p3d}) + cy_rgb \end{cases} \quad (40)$$

onde, fx_rgb , fy_rgb , cx_rgb , cy_rgb são os valores intrínsecos da câmera colorida e x_c, y_c a posição em pixel da cor relacionada ao pixel da câmera de infravermelho. A Figura 37 mostra o resultado da imagem de infravermelho sendo sobreposta pelo objeto colorido da imagem da câmera RGB.



Figura 37 - Imagem calibrada das câmeras RGB e IR

A qualidade do resultado da calibração está diretamente relacionada com a qualidade das imagens obtidas. Alguns cuidados devem ser observados durante o processo de aquisição da imagem como:

- Manter o Kinect[®] estático;
- Manter o quadro de calibração estático;
- Utilizar iluminação adequada e controlada em ambiente interno;
- Ligar o Kinect[®] somente após a preparação do ambiente;
- Utilizar um número elevado de imagens do quadro de calibração.

5.2 CALIBRAÇÃO IR-RGB

Este método de calibração funciona muito bem para delimitar áreas de captura ou posicionar ponteiros em posições equivalentes das duas imagens, mas essa função não foi suficiente para chegar ao resultado esperado neste trabalho.

A calibração do quadro de captura da imagem IR para RGB resulta em uma imagem de tamanho diferente em quantidade de pixels. O resultado da calibração obtida pelo sistema de um quadro de captura, mostrado na Figura 38, possui uma quantidade de pixels menor que a imagem IR, apesar de visualmente representar o mesmo espaço. Nesse caso, apesar da calibração resolver a posição do pixel IR na imagem RGB, a cor obtida pode não ser exata. Na prática, ao adicionar a cor à imagem IR nessas condições, resulta em uma imagem imprecisa e distorcida.

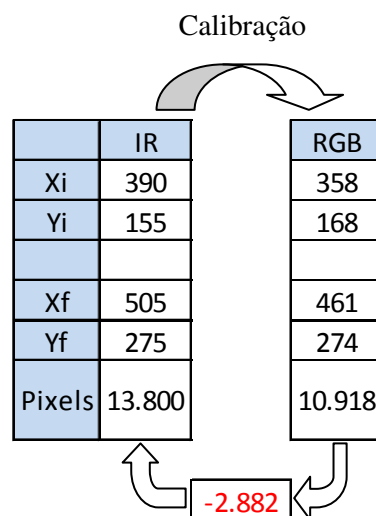


Figura 38 - Calibração do quadro de captura

A solução para esse problema foi aplicar um algoritmo de redimensionamento da imagem RGB para a imagem IR. Essa função consiste em aplicar diversas transformações geométricas que não alteram o conteúdo da imagem, mas a deformam para encaixar a grade de pixel na imagem de destino.

O método utilizado para essa solução foi a interpolação bilinear que consiste na extrapolação de pixels não existentes. Este método está implementado na biblioteca OpenCV e foi utilizado fornecendo o quadro da imagem RGB calibrada como fonte e um quadro da imagem IR como destino. O resultado dessa transformação foi um ponteiro da imagem com as cores RGB da posição equivalente da imagem IR. A Figura 37 da seção anterior representa o resultado com o redimensionamento da imagem.

5.3 CORREÇÃO DE ERROS DE DISPARIDADE

Os resultados da aplicação da correção podem ser visualizados na Figura 39. A imagem à esquerda mostra um objeto com erosão na sua borda e à direita a imagem com a aplicação do algoritmo de interpolação apenas no quadro de captura determinado. A Tabela 7 mostra a quantidade de pixels corrigidos para recomposição do objeto. A eficácia da correção quanto à recomposição da área e profundidade do objeto foi observada nos experimentos de validação, nos quais os resultados dos cálculos poderiam ser afetados.

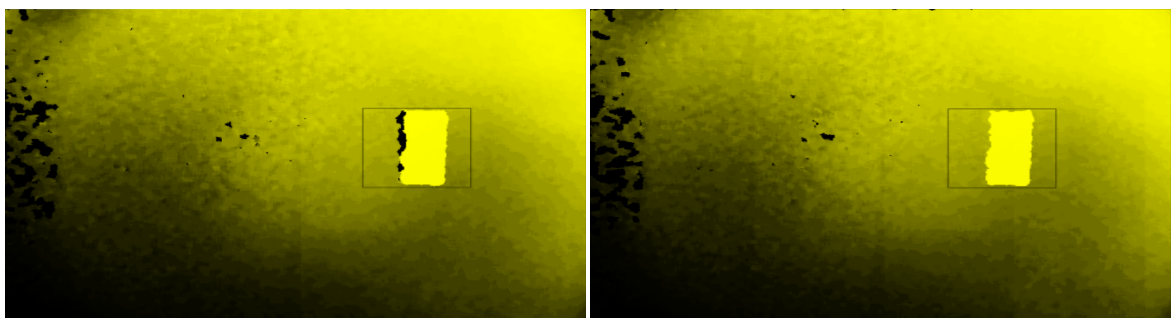


Figura 39 - Imagem IR original (esq.) e IR interpolada (dir.)

Tabela 7 - Pixels corrigidos

Frame	Total Pixels da Imagem	Erosão Total (pixel)	%	Total Pixels do Quadro	Correção	
					Erosão do Quadro (pixes)	%
1	307200	16947	5	13800	644	4
2	307200	17342	5	13800	579	4
3	307200	16948	5	13800	614	4
4	307200	16706	5	13800	598	4
5	307200	21317	6	13800	560	4
6	307200	5851	1	13800	558	4
7	307200	6590	2	13800	531	3
8	307200	5874	1	13800	535	3
9	307200	5943	1	13800	548	3
10	307200	6204	2	13800	540	3
11	307200	5980	1	13800	606	4
12	307200	6601	2	13800	541	3
13	307200	6468	2	13800	587	4
14	307200	5919	1	13800	578	4
15	307200	5816	1	13800	549	3
16	307200	5983	1	13800	530	3
17	307200	6081	1	13800	629	4
18	307200	5861	1	13800	525	3
19	307200	6196	2	13800	569	4
20	307200	5905	1	13800	552	4

5.4 VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA DO PIXEL

Os resultados do experimento realizado para detecção de material adicionado mostram as leituras do quadro de captura com a quantidade de pixels que variaram a distância. A Tabela 8, com 58 amostras de leituras, registra a variação tanto acima do plano da referência quanto abaixo, além da distância máxima em milímetros e o percentual de pixel com variação em relação ao total do quadro. Os resultados comprovam que podem existir variações nas distâncias de um pixel de uma mesma posição em *frames* diferentes. Entretanto, o percentual de pixels que apresentou esta anomalia ficou abaixo de 0,06%, em média, com desvio padrão de 0,034.

Em comparação com outras amostras, percebe-se que variações no ambiente ou mesmo erros de precisão nos cálculos de disparidade podem ser os maiores responsáveis. Apesar de ficar comprovada a ocorrência das variações das leituras, 99,94% dos pixels na área amostrada não apresentaram variações nas distâncias obtidas pelo sensor.

Tabela 8 - Variações de leitura do quatro de captura.

		Pixels abaixo da referência		Pixels acima da referência		Total de Pixels variantes				Pixels abaixo da referência		Pixels acima da referência		Total de Pixels variantes	
Frame	Pixes do quadro	Qtd. Pixel	Distância Max. (mm)	Qtd. Pixel	Distância Max. (mm)	Pixel	% variacao	Frame	Pixes do quadro	Qtd. Pixel	Distância Max. (mm)	Qtd. Pixel	Distância Max. (mm)	Pixel	% variacao
1	13800	0	0,00	0	0	0	0,0000	30	13800	11	2,18	0	0,00	11	0,0797
2	13800	0	0,00	0	0	0	0,0000	31	13800	15	2,13	1	4,00	16	0,1159
3	13800	0	0,00	1	4	1	0,0072	32	13800	12	2,17	0	0,00	12	0,0870
4	13800	0	0,00	0	0	0	0,0000	33	13800	16	2,13	3	2,67	19	0,1377
5	13800	0	0,00	1	4	1	0,0072	34	13800	12	2,17	3	2,67	15	0,1087
6	13800	0	0,00	1	4	1	0,0072	35	13800	8	2,25	1	4,00	9	0,0652
7	13800	0	0,00	0	0	0	0,0000	36	13800	5	2,40	0	0,00	5	0,0362
8	13800	0	0,00	0	0	0	0,0000	37	13800	10	2,20	0	0,00	10	0,0725
9	13800	0	0,00	0	0	0	0,0000	38	13800	11	2,18	0	0,00	11	0,0797
10	13800	0	0,00	0	0	0	0,0000	39	13800	13	2,15	1	4,00	14	0,1014
11	13800	2	3,00	0	0	2	0,0145	40	13800	11	2,18	0	0,00	11	0,0797
12	13800	6	2,33	0	0	6	0,0435	41	13800	14	2,14	0	0,00	14	0,1014
13	13800	4	2,50	0	0	4	0,0290	42	13800	10	2,20	1	4,00	11	0,0797
14	13800	3	2,67	0	0	3	0,0217	43	13800	6	2,33	0	0,00	6	0,0435
15	13800	0	0,00	2	3	2	0,0145	44	13800	12	2,17	0	0,00	12	0,0870
16	13800	4	2,50	0	0	4	0,0290	45	13800	9	2,22	0	0,00	9	0,0652
17	13800	3	2,67	3	2,67	6	0,0435	46	13800	6	2,33	0	0,00	6	0,0435
18	13800	3	2,67	0	0	3	0,0217	47	13800	8	2,25	0	0,00	8	0,0580
19	13800	5	2,40	0	0	5	0,0362	48	13800	8	2,25	0	0,00	8	0,0580
20	13800	7	2,29	0	0	7	0,0507	49	13800	8	2,25	0	0,00	8	0,0580
21	13800	6	2,33	0	0	6	0,0435	50	13800	8	2,25	0	0,00	8	0,0580
22	13800	8	2,25	1	4	9	0,0652	51	13800	5	2,40	0	0,00	5	0,0362
23	13800	11	2,18	0	0	11	0,0797	52	13800	9	2,22	3	2,67	12	0,0870
24	13800	9	2,22	0	0	9	0,0652	53	13800	8	2,25	2	3,00	10	0,0725
25	13800	3	2,67	0	0	3	0,0217	54	13800	10	2,20	2	3,00	12	0,0870
26	13800	6	2,33	0	0	6	0,0435	55	13800	12	2,17	1	4,00	13	0,0942
27	13800	10	2,20	1	4	11	0,0797	56	13800	9	2,22	0	0,00	9	0,0652
28	13800	9	2,22	0	0	9	0,0652	57	13800	7	2,29	4	2,50	11	0,0797
29	13800	9	2,22	1	4	10	0,0725	58	13800	13	2,15	1	4,00	14	0,1014
								Média	8	2,22	0	0,00	8	0,0580	
								Desvio Padrão	5	0,92	1	1,72	5	0,0348	

5.5 VALIDAÇÃO

Nos experimentos com objetos de dimensões conhecidas, os valores absolutos de diferença de área, volume e massa real foram comparados pelo teste t com os valores absolutos da área, volume e massa calculados, com e sem iluminação.

No primeiro experimento com um objeto foram comparados os resultados da Tabela 9, com iluminação, com os da Tabela 10, sem iluminação. O resultado do teste t resultou em valor $p = 0,0000198$ para a área e valor $p = 0,4377166$ para o volume. Os valores de p iguais ou próximos a 1 mostram muita semelhança e abaixo de 0,5 pouca semelhança. Desse modo, pode-se afirmar que o resultado do teste sem iluminação foi muito mais preciso em relação ao teste com iluminação. No caso da detecção da cor vermelha do objeto, o teste sem iluminação obteve melhor resultado. Em relação ao cálculo da massa, apesar de os valores terem sido

semelhantes, o teste sem iluminação apresentou menor desvio padrão e, ao aplicar o teste t , obteve-se valor $p = 0,2355633$.

Tabela 9 - Medição de um objeto com iluminação artificial.

Frame	Erosão do Quadro		Pixels Objeto	Tamanho Pixel	Área objeto	Área Real	Diferença Área Calculada / Real		Volume Objeto	Volume Real	Diferença Volume Calculado/Real		Densidade	Massa Calculada	Massa Real	Diferença Massa Real / Calculada		Vermelho	Verde	Azul	Outras Cores
	pixel	%					mm ²	%			mm ³	%		g/cm ³	g	g	g	%			
1	4	0,03	200	0,53	105,95	100	5,95	6,0	977,12	1.000	-22,88	-2,3	0,578	0,56	0,58	-0,02	-3,11	97,5	0	0	2,5
2	2	0,01	199	0,53	105,23	100	5,23	5,2	1.047,67	1.000	47,67	4,8	0,578	0,61	0,58	0,03	5,54	100	0	0	0
3	2	0,01	201	0,53	106,21	100	6,21	6,2	1.061,60	1.000	61,6	6,2	0,578	0,61	0,58	0,03	5,54	99,5	0	0	0,5
4	35	0,25	193	0,53	102,07	100	2,07	2,1	1.007,47	1.000	7,47	0,7	0,578	0,58	0,58	0,00	0,35	98,96	0	0	1,04
5	15	0,11	196	0,53	103,57	100	3,57	3,6	1.035,12	1.000	35,12	3,5	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	98,38	0	0	1,62
6	1	0,01	199	0,53	105,22	100	5,22	5,2	1.041,20	1.000	41,2	4,1	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	99,49	0	0	0,51
7	3	0,02	199	0,53	105,19	100	5,19	5,2	1.051,55	1.000	51,55	5,2	0,578	0,61	0,58	0,03	5,54	98,49	0	0	1,51
8	37	0,27	180	0,53	95,15	100	-4,85	-4,8	962,54	1.000	-37,46	-3,7	0,578	0,56	0,58	-0,02	-3,11	97,44	0	0	2,56
9	32	0,23	191	0,53	100,93	100	0,93	0,9	1.014,46	1.000	14,46	1,4	0,578	0,59	0,58	0,01	2,08	97,38	0	0	2,62
10	18	0,13	199	0,53	105,12	100	5,12	5,1	1.058,11	1.000	58,11	5,8	0,578	0,61	0,58	0,03	5,54	97,99	0	0	2,01
11	21	0,15	197	0,53	104,01	100	4,01	4,0	1.060,69	1.000	60,69	6,1	0,578	0,61	0,58	0,03	5,54	99,49	0	0	0,51
12	36	0,26	197	0,53	104,11	100	4,11	4,1	1.037,40	1.000	37,4	3,7	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	97,46	0	0	2,54
13	36	0,26	199	0,53	105,26	100	5,26	5,3	1.020,96	1.000	20,96	2,1	0,578	0,59	0,58	0,01	2,08	99,5	0	0	0,5
14	5	0,04	201	0,53	106,20	100	6,2	6,2	1.061,84	1.000	61,84	6,2	0,578	0,61	0,58	0,03	5,54	99,5	0	0	0,5
15	4	0,03	199	0,53	105,18	100	5,18	5,2	1.041,71	1.000	41,71	4,2	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	98,49	0	0	1,51
16	38	0,28	191	0,53	100,96	100	0,96	1,0	1.007,39	1.000	7,39	0,7	0,578	0,58	0,58	0,00	0,35	96,34	0	0	3,66
17	31	0,22	190	0,53	100,42	100	0,42	0,4	1.005,44	1.000	5,44	0,5	0,578	0,58	0,58	0,00	0,35	98,42	0	0	1,58
18	46	0,33	189	0,53	100,05	100	0,05	0,0	964,36	1.000	-35,64	-3,6	0,578	0,56	0,58	-0,02	-3,11	96,83	0	0	3,17
19	1	0,01	195	0,52	102,33	100	2,33	2,3	1.042,97	1.000	42,97	4,3	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	100	0	0	0
20	3	0,02	195	0,52	102,33	100	2,33	2,3	1.044,53	1.000	44,53	4,5	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	100	0	0	0
Média			196		103,27		3,27	3,27	1.027,21		27,21	2,72		0,59		0,02	2,60	98,56	0,00	0,00	1,44
Desv. Padrão			5,23		2,78		2,78	2,78	31,36		31,36	3,14		0,02		0,02	3,03	1,13	0,00	0,00	1,13

Tabela 10 - Medição de um objeto sem iluminação.

Frame	Erosao Quadro		Pixels Objeto	Tamanho Pixel	Área objeto	Área Real	Diferença Área Calculada / Real		Volume Objeto	Volume Real	Diferença Volume Calculado/Real		Densidade	Massa Calculada	Massa Real	Diferença Massa Real / Calculada		Vermelho	Verde	Azul	Outras Cores
	pixel	%					mm ²	%			mm ³	%		g/cm ³	g	g	g	%			
1	0	0,00	192	0,52	100,66	100	0,66	0,7	1.051,67	1.000	51,67	5,2	0,578	0,61	0,58	0,03	5,54	99,99	0	0	0,01
2	0	0,00	191	0,52	100,20	100	0,2	0,2	1.036,19	1.000	36,19	3,6	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	99,47	0	0	0,53
3	0	0,00	192	0,52	100,71	100	0,71	0,7	1.038,27	1.000	38,27	3,8	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	98,95	0	0	1,05
4	0	0,00	191	0,52	100,18	100	0,18	0,2	1.032,50	1.000	32,50	3,3	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	99,99	0	0	0,01
5	0	0,00	190	0,52	99,63	100	-0,37	-0,4	1.034,30	1.000	34,30	3,4	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	100,00	0	0	0,00
6	0	0,00	191	0,52	100,19	100	0,19	0,2	1.031,55	1.000	31,55	3,2	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	99,99	0	0	0,01
7	0	0,00	191	0,52	100,24	100	0,24	0,2	1.022,65	1.000	22,65	2,3	0,578	0,59	0,58	0,01	2,08	99,47	0	0	0,53
8	0	0,00	192	0,52	100,72	100	0,72	0,7	1.042,56	1.000	42,56	4,3	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	99,47	0	0	0,53
9	0	0,00	192	0,52	100,71	100	0,71	0,7	1.036,44	1.000	36,44	3,6	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	99,99	0	0	0,01
10	0	0,00	191	0,52	100,21	100	0,21	0,2	1.033,13	1.000	33,13	3,3	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	99,47	0	0	0,53
11	0	0,00	192	0,52	100,72	100	0,72	0,7	1.036,08	1.000	36,08	3,6	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	97,39	0	0	2,61
12	0	0,00	190	0,52	99,73	100	-0,27	-0,3	1.016,49	1.000	16,49	1,6	0,578	0,59	0,58	0,01	2,08	100,00	0	0	0,00
13	0	0,00	191	0,52	100,23	100	0,23	0,2	1.024,08	1.000	24,08	2,4	0,578	0,59	0,58	0,01	2,08	99,47	0	0	0,53
14	0	0,00	191	0,52	100,27	100	0,27	0,3	1.017,59	1.000	17,59	1,8	0,578	0,59	0,58	0,01	2,08	99,47	0	0	0,53
15	0	0,00	190	0,52	99,75	100	-0,25	-0,3	1.012,49	1.000	12,49	1,2	0,578	0,59	0,58	0,01	2,08	100,00	0	0	0,00
16	0	0,00	191	0,52	100,07	100	0,07	0,1	1.056,18	1.000	56,18	5,6	0,578	0,61	0,58	0,03	5,54	99,99	0	0	0,01
17	1	0,01	192	0,52	100,67	100	0,67	0,7	1.046,00	1.000	46,00	4,6	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	99,99	0	0	0,01
18	0	0,00	190	0,52	99,70	100	-0,3	-0,3	1.022,50	1.000	22,50	2,3	0,578	0,59	0,58	0,01	2,08	100,00	0	0	0,00
19	1	0,01	191	0,52	100,19	100	0,19	0,2	1.038,31	1.000	38,31	3,8	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	99,99	0	0	0,01
20	0	0,00	190	0,52	99,63	100	-0,37	-0,4	1.032,19	1.000	32,19	3,2	0,578	0,60	0,58	0,02	3,81	99,47	0	0	0,53
Média			191		100,22		0,22	0,22	1.033,06		33,06	3,31		0,60		0,02	3,46	99,63	0,00	0,00	0,37
Desv. Padrão			0,76		0,39		0,39	0,39	11,39		11,39	1,14		0,01		0,01	1,07	0,61	0,00	0,00	0,61

Considerando o experimento com 3 cubos, um de cada cor, na Tabela 11 estão apresentados os resultados das leituras sem iluminação e, na Tabela 12, os resultados das leituras com iluminação. O resultado do teste t para a área resultou em valor $p = 2,8983\text{E-}12$. O valor p para volume foi de 0,8689463, mostrando que os resultados foram semelhantes. Para os valores da massa calculada o valor p foi de 0,5952953, também mostrando certa semelhança nos resultados. Para as cores, o teste com iluminação foi capaz de identificar melhor a sua composição, em comparação ao teste sem a iluminação. Considerando que a composição foi de 33% de cada cor, a amostra da Tabela 12 apresentou melhor resultado.

No último experimento com todos os 12 cubos, os resultados sem iluminação estão apresentados na Tabela 13 e, com iluminação, na Tabela 14. Os resultados absolutos das diferenças de área, volume e massa foram comparados pelo teste t , tendo-se obtido, respectivamente, os seguintes valores de p : 0,0001322; 0,5531111 e 0,5591144. Os resultados apontam que apenas a área mostrou-se mais precisa nos testes sem iluminação. Os valores calculados para volume e massa foram estatisticamente iguais quanto à precisão nos cálculos, mostrando que o fator iluminação não afetou tais medições. Já, na identificação das cores, os resultados mostraram que a iluminação melhorou a sua identificação, principalmente da cor

Tabela 11 - Medição de 3 cubos sem iluminação.

Frame	Erosao		Pixels Objeto	Tamanho Pixel	Área objeto	Área Real	Diferença Área Calculada / Real		Volume Objeto	Volume Real	Diferença Volume Calculado/Real		Densidade	Massa Calculada	Massa Real	Diferença Massa Real / Calculada		Vermelho	Verde	Azul	Outras Cores
	pixel	%					mm ²	%		mm ³	mm ³	%		g/cm ³	g	g	g	%	%	%	%
1	6	0	602	0,52	310,74	300	10,74	3,6	3.185,40	3.000	185,40	6,2	0,542	1,73	1,63	0,10	6,33	34,11	31,78	28,80	5,31
2	9	0	600	0,52	309,69	300	9,69	3,2	3.168,62	3.000	168,62	5,6	0,542	1,72	1,63	0,09	5,72	29,45	41,10	23,96	5,49
3	15	0	588	0,52	303,67	300	3,67	1,2	3.076,87	3.000	76,87	2,6	0,542	1,67	1,63	0,04	2,64	34,92	30,16	31,02	3,90
4	33	0	602	0,52	310,94	300	10,94	3,6	3.134,11	3.000	134,11	4,5	0,542	1,70	1,63	0,07	4,49	27,53	44,95	23,55	3,98
5	24	0	599	0,52	309,44	300	9,44	3,1	3.104,05	3.000	104,05	3,5	0,542	1,68	1,63	0,05	3,26	30,45	39,11	26,62	3,83
6	24	0	601	0,52	310,7	300	10,7	3,6	3.074,70	3.000	74,70	2,5	0,542	1,67	1,63	0,04	2,64	30,90	38,20	24,42	6,48
7	15	0	596	0,52	307,97	300	7,97	2,7	3.078,43	3.000	78,43	2,6	0,542	1,67	1,63	0,04	2,64	31,27	37,46	26,41	4,86
8	19	0	597	0,52	308,25	300	8,25	2,8	3.126,48	3.000	126,48	4,2	0,542	1,69	1,63	0,06	3,87	30,21	39,57	26,36	3,85
9	30	0	596	0,52	307,64	300	7,64	2,5	3.144,59	3.000	144,59	4,8	0,542	1,70	1,63	0,07	4,49	35,46	29,09	30,10	5,36
10	35	0	592	0,52	305,57	300	5,57	1,9	3.113,84	3.000	113,84	3,8	0,542	1,69	1,63	0,06	3,87	38,67	22,65	33,95	4,72
11	29	0	596	0,52	307,71	300	7,71	2,6	3.132,80	3.000	132,80	4,4	0,542	1,70	1,63	0,07	4,49	43,00	14,01	39,65	3,35
12	4	0	602	0,52	310,71	300	10,71	3,6	3.167,59	3.000	167,59	5,6	0,542	1,72	1,63	0,09	5,72	34,22	31,57	28,08	6,14
13	24	0	602	0,52	310,94	300	10,94	3,6	3.122,09	3.000	122,09	4,1	0,542	1,69	1,63	0,06	3,87	34,28	21,44	39,80	4,48
14	41	0	602	0,52	310,78	300	10,78	3,6	3.162,48	3.000	162,48	5,4	0,542	1,71	1,63	0,08	5,10	33,84	22,33	37,70	6,14
15	16	0	603	0,52	311,3	300	11,3	3,8	3.161,75	3.000	161,75	5,4	0,542	1,71	1,63	0,08	5,10	36,80	26,41	31,50	5,30
16	9	0	602	0,52	310,68	300	10,68	3,6	3.182,65	3.000	182,65	6,1	0,542	1,72	1,63	0,09	5,72	32,06	35,88	26,42	5,64
17	10	0	603	0,52	311,29	300	11,29	3,8	3.180,42	3.000	180,42	6,0	0,542	1,72	1,63	0,09	5,72	34,60	30,80	32,12	2,48
18	19	0	598	0,52	308,74	300	8,74	2,9	3.148,50	3.000	148,50	5,0	0,542	1,71	1,63	0,08	5,10	30,55	38,90	24,04	6,51
19	48	0	581	0,52	300,05	300	0,05	0,0	3.042,20	3.000	42,20	1,4	0,542	1,65	1,63	0,02	1,41	31,73	36,53	28,81	2,92
20	213	1	584	0,52	304,59	300	4,59	1,5	3.045,71	3.000	45,71	1,5	0,542	1,65	1,63	0,02	1,46	32,53	34,93	28,26	4,27
Média			597		308,57		8,57	2,86	3.127,66		127,66	4,26		1,70		0,07	4,18	33,33	32,34	29,58	4,75
Desv. Padrão			6,42		3,03		3,03	1,01	44,83		44,83	1,49		0,02		0,02	1,45	3,51	7,87	4,99	1,17

Tabela 12 - Medição de 3 cubos com iluminação.

Frame	Erosao Quadro	Pixels Objeto	Tamanho Pixel	Área objeto	Área Real	Diferença Área Calculada / Real		Volume Objeto	Volume Real	Diferença Volume Calculado/Real		Densidade	Massa Calculada	Massa Real	Diferença Massa Real / Calculada		Vermelho	Verde	Azul	Outras Cores	
						mm²	%			mm³	%				g	%					%
	pixel	%	Pixels	mm²	mm²	mm²	%	mm³	mm³	mm³	%	g/cm³	g	g	g	%	%	%	%	%	
1	8	0	646	0,53	339,67	300	39,67	13,2	3.273,58	3.000	273,58	9,1	0,542	1,77	1,63	0,14	8,79	32,83	33,92	33,26	0,00
2	20	0	648	0,53	340,72	300	40,72	13,6	3.286,90	3.000	286,90	9,6	0,542	1,78	1,63	0,15	9,40	33,12	31,69	35,20	0,00
3	10	0	651	0,53	342,29	300	42,29	14,1	3.291,36	3.000	291,36	9,7	0,542	1,78	1,63	0,15	9,40	34,37	32,09	33,55	0,00
4	12	0	651	0,53	342,45	300	42,45	14,2	3.240,74	3.000	240,74	8,0	0,542	1,76	1,63	0,13	8,17	33,83	33,13	33,04	0,00
5	9	0	644	0,53	338,7	300	38,7	12,9	3.229,85	3.000	229,85	7,7	0,542	1,75	1,63	0,12	7,56	32,92	33,93	33,16	0,00
6	12	0	633	0,53	332,73	300	32,73	10,9	3.244,34	3.000	244,34	8,1	0,542	1,76	1,63	0,13	8,17	33,34	35,13	31,53	0,00
7	12	0	603	0,53	316,99	300	16,99	5,7	3.105,80	3.000	105,80	3,5	0,542	1,68	1,63	0,05	3,26	31,46	34,12	34,43	0,00
8	3	0	612	0,53	321,95	300	21,95	7,3	3.086,14	3.000	86,14	2,9	0,542	1,67	1,63	0,04	2,64	32,97	34,19	32,84	0,00
9	4	0	596	0,53	313,63	300	13,63	4,5	3.005,33	3.000	5,33	0,2	0,542	1,63	1,63	0,00	0,18	34,33	34,73	30,94	0,00
10	23	0	603	0,53	317,33	300	17,33	5,8	3.055,20	3.000	55,20	1,8	0,542	1,66	1,63	0,03	2,03	33,28	30,77	35,95	0,00
11	6	0	604	0,53	318,12	300	18,12	6,0	2.945,80	3.000	-54,20	-1,8	0,542	1,6	1,63	-0,03	-1,66	32,57	33,35	34,08	0,00
12	8	0	621	0,53	327,03	300	27,03	9,0	3.059,24	3.000	59,24	2,0	0,542	1,66	1,63	0,03	2,03	34,12	32,45	33,43	0,00
13	4	0	634	0,53	334,01	300	34,01	11,3	3.081,73	3.000	81,73	2,7	0,542	1,67	1,63	0,04	2,64	32,50	33,13	34,38	0,00
14	2	0	620	0,53	326,57	300	26,57	8,9	3.035,05	3.000	35,05	1,2	0,542	1,64	1,63	0,01	0,80	33,40	33,74	32,87	0,00
15	3	0	642	0,53	338,44	300	38,44	12,8	3.069,76	3.000	69,76	2,3	0,542	1,66	1,63	0,03	2,03	32,17	33,99	33,84	0,00
16	2	0	623	0,53	328,2	300	28,2	9,4	3.055,66	3.000	55,66	1,9	0,542	1,66	1,63	0,03	2,03	33,37	31,30	35,33	0,00
17	5	0	639	0,53	336,78	300	36,78	12,3	3.088,92	3.000	88,92	3,0	0,542	1,67	1,63	0,04	2,64	33,19	34,75	32,07	0,00
18	12	0	647	0,53	340,87	300	40,87	13,6	3.141,82	3.000	141,82	4,7	0,542	1,7	1,63	0,07	4,49	33,25	32,75	34,00	0,00
19	6	0	627	0,53	330,25	300	30,25	10,1	3.061,92	3.000	61,92	2,1	0,542	1,66	1,63	0,03	2,03	33,73	31,56	34,71	0,00
20	3	0	650	0,53	342,72	300	42,72	14,2	3.111,73	3.000	111,73	3,7	0,542	1,69	1,63	0,06	3,87	33,10	33,71	33,19	0,00
Média			630		331,47		31,47	10,49	3.123,54		123,54	4,12		1,69		0,07	4,03	33,19	33,22	33,59	0,00
Desv. Padrão			18,42		9,72		9,72	3,24	101,47		101,47	3,38		0,05		0,05	3,34	0,71	1,24	1,25	0,00

Tabela 13 - Medição de 12 cubos sem iluminação.

Frame	Erosao Quadro	Pixels Objeto	Tamanho Pixel	Área objeto	Área Real	Diferença		Volume Objeto	Volume Real	Diferença		Densidade	Massa Calculada	Massa Real	Diferença		Vermelho	Verde	Azul	Outras Cores	
						Área Calculada / Real				Volume Calculado/Real					Massa Real / Calculada						
						mm²	%			mm³	%				g	%					g
1	362	2	2.362	0,52	1.227	1.200	27,49	2,29	12.124,83	12.000	124,83	1,04	0,551	6,68	6,61	0,07	1,09	32,51	8,08	57,06	2,35
2	337	2	2.363	0,52	1.228	1.200	28,01	2,33	12.030,57	12.000	30,57	0,25	0,551	6,63	6,61	0,02	0,3	36,90	9,92	52,12	1,06
3	354	2	2.348	0,52	1.219	1.200	19,25	1,6	12.229,19	12.000	229,19	1,91	0,551	6,74	6,61	0,13	1,96	37,21	10,30	51,66	0,83
4	329	2	2.371	0,52	1.231	1.200	30,59	2,55	12.389,01	12.000	389,01	3,24	0,551	6,83	6,61	0,22	3,29	36,60	9,19	52,81	1,40
5	403	2	2.373	0,52	1.233	1.200	32,50	2,71	12.256,46	12.000	256,46	2,14	0,551	6,75	6,61	0,14	2,18	34,04	8,11	55,24	2,62
6	288	2	2.349	0,52	1.220	1.200	20,00	1,67	12.133,25	12.000	133,25	1,11	0,551	6,69	6,61	0,08	1,16	36,18	10,94	51,92	0,96
7	319	2	2.360	0,52	1.226	1.200	25,53	2,13	12.173,29	12.000	173,29	1,44	0,551	6,71	6,61	0,1	1,49	36,94	10,35	51,81	0,90
8	397	2	2.358	0,52	1.224	1.200	24,26	2,02	12.258,02	12.000	258,02	2,15	0,551	6,75	6,61	0,15	2,2	32,14	9,60	55,51	2,75
9	403	2	2.363	0,52	1.227	1.200	27,37	2,28	12.157,96	12.000	157,96	1,32	0,551	6,7	6,61	0,09	1,36	36,30	11,00	51,80	0,90
10	321	2	2.360	0,52	1.226	1.200	25,95	2,16	12.174,85	12.000	174,85	1,46	0,551	6,71	6,61	0,1	1,5	35,78	10,02	52,80	1,40
11	325	2	2.352	0,52	1.222	1.200	21,73	1,81	12.103,82	12.000	103,82	0,87	0,551	6,67	6,61	0,06	0,91	35,13	12,15	51,81	0,91
12	341	2	2.348	0,52	1.219	1.200	19,43	1,62	12.100,58	12.000	100,58	0,84	0,551	6,67	6,61	0,06	0,88	36,22	9,60	52,79	1,39
13	421	3	2.355	0,52	1.224	1.200	23,79	1,98	11.927,28	12.000	-72,72	-0,61	0,551	6,57	6,61	-0,04	-0,56	32,66	9,63	55,14	2,57
14	359	2	2.340	0,52	1.215	1.200	15,10	1,26	12.057,79	12.000	57,79	0,48	0,551	6,64	6,61	0,03	0,53	33,27	10,36	54,25	2,13
15	379	2	2.351	0,52	1.221	1.200	20,68	1,72	12.064,00	12.000	64,00	0,53	0,551	6,65	6,61	0,04	0,58	35,37	9,72	53,27	1,64
16	378	2	2.349	0,52	1.219	1.200	18,82	1,57	12.322,31	12.000	322,31	2,69	0,551	6,79	6,61	0,18	2,73	36,81	8,82	52,91	1,46
17	392	2	2.339	0,52	1.214	1.200	13,80	1,15	12.205,85	12.000	205,85	1,72	0,551	6,73	6,61	0,12	1,76	34,70	8,93	54,25	2,12
18	316	2	2.344	0,52	1.216	1.200	16,12	1,34	12.300,69	12.000	300,69	2,51	0,551	6,78	6,61	0,17	2,55	34,81	8,90	54,19	2,10
19	373	2	2.369	0,52	1.231	1.200	30,52	2,54	12.130,72	12.000	130,72	1,09	0,551	6,68	6,61	0,08	1,14	33,73	9,57	54,47	2,23
20	382	2	2.363	0,52	1.227	1.200	27,08	2,26	12.183,95	12.000	183,95	1,53	0,551	6,71	6,61	0,1	1,58	34,03	9,58	54,26	2,13
Média			2.356		1.223		23,40	1,95	12.166,22		166,22	1,39		6,70		0,10	1,43	35,07	9,74	53,50	1,69
Desv. Padrão			9,89		5,40		5,40	0,45	108,74		108,74	0,91		0,06		0,06	0,91	1,62	0,97	1,52	0,65

Tabela 14 - Medição de 12 cubos com iluminação.

Frame	Erosao Quadro	Pixels Objeto	Tamanho Pixel	Área objeto	Área Real	Diferença Área Calculada / Real		Volume Objeto	Volume Real	Diferença Volume Calculado/Real		Densidade	Massa Calculada	Massa Real	Diferença Massa Real / Calculada		Vermelho	Verde	Azul	Outras Cores	
	pixel	%	Pixels	mm²	mm²	mm²	mm²	%	mm³	mm³	mm³	%	g/cm³	g	g	g	%	%	%	%	
1	362	2	2.362	0,52	1.227	1200	27,49	2,29	12.124,83	12.000	124,83	1,04	0,551	6,68	6,61	0,07	1,09	33,92	31,97	34,11	0
2	337	2	2.363	0,52	1.228	1200	28,01	2,33	12.030,57	12.000	30,57	0,25	0,551	6,63	6,61	0,02	0,30	33,61	31,58	34,81	0
3	373	2	2.376	0,52	1.234	1200	34,48	2,87	12.198,43	12.000	198,43	1,65	0,551	6,72	6,61	0,11	1,70	33,38	31,66	34,96	0
4	350	2	2.380	0,52	1.236	1200	35,68	2,97	12.308,90	12.000	308,90	2,57	0,551	6,78	6,61	0,17	2,62	34,32	31,63	34,05	0
5	329	2	2.371	0,52	1.231	1200	30,59	2,55	12.389,01	12.000	389,01	3,24	0,551	6,83	6,61	0,22	3,29	33,55	32,16	34,29	0
6	403	2	2.373	0,52	1.233	1200	32,50	2,71	12.256,46	12.000	256,46	2,14	0,551	6,75	6,61	0,14	2,18	32,73	31,13	36,13	0
7	343	2	2.374	0,52	1.233	1200	32,78	2,73	12.281,88	12.000	281,88	2,35	0,551	6,77	6,61	0,16	2,40	33,23	32,52	34,25	0
8	319	2	2.360	0,52	1.226	1200	25,53	2,13	12.173,29	12.000	173,29	1,44	0,551	6,71	6,61	0,10	1,49	33,89	32,11	34,00	0
9	393	2	2.373	0,52	1.233	1200	32,60	2,72	12.168,17	12.000	168,17	1,40	0,551	6,7	6,61	0,10	1,45	33,45	31,43	35,12	0
10	397	2	2.358	0,52	1.224	1200	24,26	2,02	12.258,02	12.000	258,02	2,15	0,551	6,75	6,61	0,15	2,20	32,89	32,55	34,56	0
11	318	2	2.377	0,52	1.235	1200	34,68	2,89	12.240,60	12.000	240,60	2,00	0,551	6,74	6,61	0,14	2,05	32,24	32,79	34,97	0
12	403	2	2.363	0,52	1.227	1200	27,37	2,28	12.157,96	12.000	157,96	1,32	0,551	6,7	6,61	0,09	1,36	34,16	31,29	34,55	0
13	321	2	2.360	0,52	1.226	1200	25,95	2,16	12.174,85	12.000	174,85	1,46	0,551	6,71	6,61	0,10	1,50	35,71	31,18	33,11	0
14	325	2	2.352	0,52	1.222	1200	21,73	1,81	12.103,82	12.000	103,82	0,87	0,551	6,67	6,61	0,06	0,91	34,00	31,57	34,43	0
15	350	2	2.378	0,52	1.236	1200	35,65	2,97	12.132,96	12.000	132,96	1,11	0,551	6,69	6,61	0,08	1,15	34,63	31,65	33,72	0
16	421	3	2.355	0,52	1.224	1200	23,79	1,98	11.927,28	12.000	-72,72	-0,61	0,551	6,57	6,61	-0,04	-0,56	32,91	31,64	35,45	0
17	392	2	2.385	0,52	1.238	1200	38,24	3,19	12.310,07	12.000	310,07	2,58	0,551	6,78	6,61	0,17	2,63	33,48	30,51	36,01	0
18	373	2	2.369	0,52	1.231	1200	30,52	2,54	12.130,72	12.000	130,72	1,09	0,551	6,68	6,61	0,08	1,14	33,10	31,24	35,65	0
19	382	2	2.363	0,52	1.227	1200	27,08	2,26	12.183,95	12.000	183,95	1,53	0,551	6,71	6,61	0,10	1,58	35,69	30,86	33,45	0
20	397	2	2.383	0,52	1.238	1200	38,13	3,18	12.174,24	12.000	174,24	1,45	0,551	6,71	6,61	0,10	1,50	34,13	32,20	33,67	0
Média			2.370		1.230		30,35	2,53	12.186,30		186,30	1,55		6,71		0,11	1,60	33,75	31,68	34,56	0,00
Desv. Padrão			9,60		4,93		4,93	0,41	103,41		103,41	0,86		0,06		0,06	0,86	0,89	0,58	0,83	0,00

verde. Ambos os testes mostraram que o sistema conseguiu mapear melhor as três cores selecionadas utilizando-se iluminação auxiliar. A maior variável no teste foi o aumento do preenchimento do quadro de captura com os objetos e pouco espaçamento entre eles. A opção de se trabalhar com um quadro de captura reduzido, diminui as interferências nos erros de disparidade e melhora a identificação positiva das cores.

Quanto à precisão dos cálculos no último teste, o sistema conseguiu um nível de acerto acima de 98,4%, em média, para a identificação da massa e volume dos objetos. Nos testes anteriores, a precisão média foi menor, mas manteve-se acima de 95% de acerto, mesmo nas piores situações de teste.

5.6 MEDIÇÃO DE FERTILIZANTES

O experimento teve o objetivo de testar o comportamento do sensor ao detectar imagens IR da superfície de alguns materiais utilizados como fertilizantes minerais sólidos. Alguns fatores comuns aos materiais como grau de refletância, granulometria ou acomodação podem influenciar nas leituras obtidas das imagens e cálculos efetuados para se chegar ao volume e à massa do material. Isso ficou bem evidente nos resultados do experimento.

Os resultados do experimento com o SFT (Tabela 15) mostraram que o material possui boa refletância, não necessitando de muitas correções de disparidade (erosão do quadro). Os resultados dos cálculos de volume e massa tiveram desvio médio em torno de 4,35%, chegando a uma diferença de 1,47 g entre a massa real e a calculada pelo sistema.

Tabela 15 - Resultados obtidos com o sensor Kinect® para o superfosfato triplo (SFT).

Frame	Erosão do Quadro		Volume Calculado mm ³	Volume Real mm ³	Diferença Volume Calculado/Real		Densidade g/cm ³	Massa Calculada g	Massa Real g	Diferença Massa Real / Calculada	
	pixel	%			mm ³	%				g	%
1	96	0	16.537	15.936	600,65	3,77	2.106	34,83	33,56	1,27	3,78
2	133	0	16.514	15.936	577,75	3,63	2.106	34,78	33,56	1,22	3,63
3	99	0	16.376	15.936	440,29	2,76	2.106	34,49	33,56	0,93	2,77
4	75	0	16.293	15.936	356,90	2,24	2.106	34,31	33,56	0,75	2,25
5	169	1	16.359	15.936	423,04	2,65	2.106	34,45	33,56	0,89	2,66
6	13	0	16.737	15.936	800,93	5,03	2.106	35,25	33,56	1,69	5,03
7	20	0	16.291	15.936	355,47	2,23	2.106	34,31	33,56	0,75	2,24
8	71	0	16.365	15.936	429,01	2,69	2.106	34,46	33,56	0,91	2,70
9	58	0	16.614	15.936	677,85	4,25	2.106	34,99	33,56	1,43	4,26
10	183	1	16.555	15.936	618,94	3,88	2.106	34,86	33,56	1,31	3,89
11	146	1	16.675	15.936	739,01	4,64	2.106	35,12	33,56	1,56	4,64
12	86	0	16.611	15.936	675,33	4,24	2.106	34,98	33,56	1,42	4,24
13	134	0	16.752	15.936	815,73	5,12	2.106	35,28	33,56	1,72	5,13
14	110	0	16.671	15.936	734,62	4,61	2.106	35,11	33,56	1,55	4,62
15	110	0	16.677	15.936	740,62	4,65	2.106	35,12	33,56	1,56	4,65
16	161	1	16.753	15.936	817,40	5,13	2.106	35,28	33,56	1,72	5,14
17	131	0	16.699	15.936	762,85	4,79	2.106	35,17	33,56	1,61	4,79
18	128	0	16.645	15.936	708,90	4,45	2.106	35,05	33,56	1,50	4,46
19	149	1	16.719	15.936	782,51	4,91	2.106	35,21	33,56	1,65	4,92
20	174	1	16.704	15.936	768,21	4,82	2.106	35,18	33,56	1,62	4,83
Média			16.577		641,30	4,02		34,91		1,35	4,03
Desv. Padrão			158,08		158,08	0,99		0,33		0,33	0,99

Os resultados do teste com o KCl (Tabela 16) mostraram que o material possui pequena quantidade de perdas por erro de disparidade, porém maior que o SFT. Contudo, essas perdas não afetaram o desempenho do sistema, mostrando que a técnica de reconstrução foi muito eficiente nesse caso. A massa calculada para esse fertilizante apresentou diferença média de 2,76%, ou 0,92 g do valor real.

Os resultados do teste com o SAM comprovaram dificuldades do sensor em obter leituras de objetos muito reflexivos. A aparência física do SAM é semelhante a pequenos cristais e com certa transparência. A Figura 40 ilustra a imagem do produto em RGB seguida pela imagem original IR obtida do Kinect®, e a imagem reconstruída. A Tabela 17 mostra que foi possível realizar a reconstrução de até 63% dos pixels (erosão do quadro). Mesmo com um número elevado de erros de disparidade, o sistema foi capaz de alcançar uma média de diferença entre a massa real e a calculada abaixo de 15%.

Tabela 16 - Resultados obtidos com o sensor Kinect® para o cloreto de potássio (KCl).

Frame	Erosão do Quadro		Volume Calculado mm ³	Volume Real mm ³	Diferença Volume Calculado/Real		Densidade g/cm ³	Massa Calculada g	Massa Real g	Diferença Massa Real / Calculada	
	pixel	%			mm ³	%				g	%
1	430	3	18.541	18.008	533,23	2,96	1,848	34,26	33,28	0,98	2,96
2	331	2	18.374	18.008	365,66	2,03	1,848	33,95	33,28	0,67	2,03
3	373	2	18.383	18.008	374,51	2,08	1,848	33,97	33,28	0,69	2,08
4	371	2	18.360	18.008	351,77	1,95	1,848	33,93	33,28	0,65	1,95
5	337	2	18.390	18.008	381,85	2,12	1,848	33,98	33,28	0,70	2,12
6	505	3	18.517	18.008	508,60	2,82	1,848	34,22	33,28	0,94	2,82
7	343	2	18.463	18.008	455,49	2,53	1,848	34,12	33,28	0,84	2,53
8	262	1	18.501	18.008	492,54	2,74	1,848	34,19	33,28	0,91	2,73
9	394	2	18.514	18.008	505,88	2,81	1,848	34,21	33,28	0,93	2,81
10	396	2	18.523	18.008	515,23	2,86	1,848	34,23	33,28	0,95	2,86
11	595	4	18.517	18.008	508,55	2,82	1,848	34,22	33,28	0,94	2,82
12	433	3	18.553	18.008	545,48	3,03	1,848	34,29	33,28	1,01	3,03
13	449	3	18.472	18.008	464,46	2,58	1,848	34,14	33,28	0,86	2,58
14	357	2	18.513	18.008	505,40	2,81	1,848	34,21	33,28	0,93	2,80
15	296	2	18.510	18.008	501,51	2,78	1,848	34,21	33,28	0,93	2,78
16	304	2	18.466	18.008	458,38	2,55	1,848	34,13	33,28	0,85	2,54
17	439	3	18.526	18.008	517,67	2,87	1,848	34,24	33,28	0,96	2,87
18	426	3	18.496	18.008	487,66	2,71	1,848	34,18	33,28	0,90	2,70
19	292	2	18.475	18.008	466,76	2,59	1,848	34,14	33,28	0,86	2,59
20	429	3	18.555	18.008	547,03	3,04	1,848	34,29	33,28	1,01	3,03
Média			18.482		474,38	2,63		34,16		0,88	2,63
Desv. Padrão			60,28		60,28	0,33		0,11		0,11	0,33

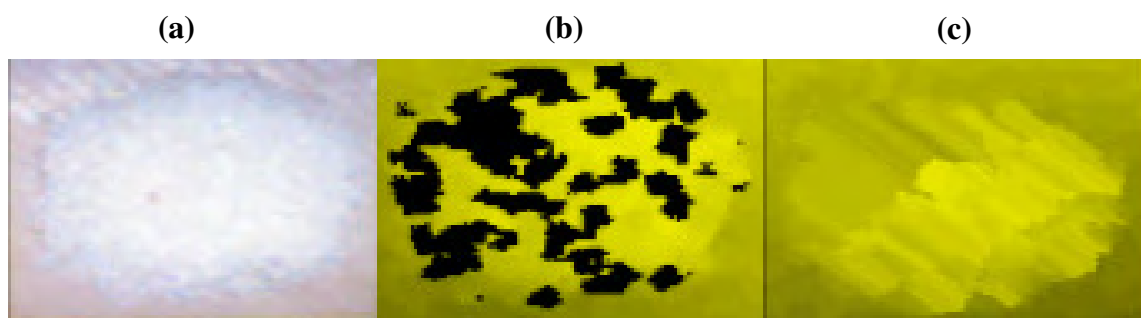


Figura 40 - Sulfato de amônio (SAM) – imagem RGB (a), imagem IR (b) e imagem IR reconstruída (c)

Os resultados dos testes com o fertilizante FTE-BR 12 (Tabela 18) e a formulação 07-11-09 (Tabela 19) mostraram diferenças de 8% e 9%, respectivamente, entre a massa real e a calculada. Tais diferenças podem ter relação com as características dos fertilizantes, como a forma e o tamanho dos grânulos, a sua acomodação e a compactação do material, as quais influenciam o volume aparente do produto. A leitura de volume aparente, nesses casos, não foi suficiente para garantir alta precisão nos cálculos da massa do material. Entretanto, o sistema proporcionou desvio padrão muito baixo entre as leituras de volume. Isso mostra que o sistema é capaz de detectar variações no volume aparente e na massa, independentemente do valor real.

Tabela 17 - Resultados obtidos com o sensor Kinect® para o sulfato de amônio (SAM).

Frame	Erosão do Quadro		Volume Calculado mm ³	Volume Real mm ³	Diferença Volume Calculado/Real		Densidade g/cm ³	Massa Calculada g	Massa Real g	Diferença Massa Real / Calculada	
	pixel	%			mm ³	%				g	%
1	7660	55	16.022	18.430	-2.407,57	-13,06	1.683	26,97	31,02	-4,05	-13,06
2	8252	59	15.560	18.430	-2.869,66	-15,57	1.683	26,19	31,02	-4,83	-15,57
3	8382	60	15.351	18.430	-3.079,34	-16,71	1.683	25,84	31,02	-5,18	-16,70
4	7780	56	16.097	18.430	-2.333,20	-12,66	1.683	27,09	31,02	-3,93	-12,66
5	2810	20	16.207	18.430	-2.223,42	-12,06	1.683	27,28	31,02	-3,74	-12,06
6	6821	49	15.723	18.430	-2.706,92	-14,69	1.683	26,46	31,02	-4,55	-14,68
7	5195	37	15.744	18.430	-2.686,37	-14,58	1.683	26,50	31,02	-4,52	-14,57
8	8066	58	15.168	18.430	-3.261,89	-17,70	1.683	25,53	31,02	-5,49	-17,69
9	8146	59	16.105	18.430	-2.324,67	-12,61	1.683	27,11	31,02	-3,91	-12,61
10	8253	59	15.355	18.430	-3.075,50	-16,69	1.683	25,84	31,02	-5,17	-16,68
11	8247	59	15.277	18.430	-3.153,25	-17,11	1.683	25,71	31,02	-5,31	-17,10
12	8405	60	15.853	18.430	-2.576,58	-13,98	1.683	26,68	31,02	-4,33	-13,98
13	8345	60	15.727	18.430	-2.703,19	-14,67	1.683	26,47	31,02	-4,55	-14,66
14	8380	60	15.832	18.430	-2.597,68	-14,09	1.683	26,65	31,02	-4,37	-14,09
15	8389	60	15.724	18.430	-2.705,54	-14,68	1.683	26,46	31,02	-4,55	-14,68
16	8439	61	15.151	18.430	-3.279,23	-17,79	1.683	25,50	31,02	-5,52	-17,79
17	8078	58	15.982	18.430	-2.448,37	-13,28	1.683	26,90	31,02	-4,12	-13,28
18	8504	61	15.546	18.430	-2.883,77	-15,65	1.683	26,16	31,02	-4,85	-15,64
19	8692	62	16.191	18.430	-2.238,91	-12,15	1.683	27,25	31,02	-3,77	-12,14
20	8738	63	15.209	18.430	-3.221,24	-17,48	1.683	25,60	31,02	-5,42	-17,47
Média			15.691		-2.738,82	-14,86		26,41		-4,61	-14,86
Desv. Padrão			350,61		350,61	1,90		0,59		0,59	1,90

Tabela 18 - Resultados obtidos com o sensor Kinect® para o fertilizante FTE-BR12.

Frame	Erosão do Quadro		Volume Calculado mm ³	Volume Real mm ³	Diferença Volume Calculado/Real		Densidade g/cm ³	Massa Calculada g	Massa Real g	Diferença Massa Real / Calculada	
	pixel	%			mm ³	%				g	%
1	15	0	19.852	18.657	1.194,86	6,40	2.231	44,29	41,63	2,66	6,38
2	53	0	19.984	18.657	1.327,27	7,11	2.231	44,58	41,63	2,95	7,09
3	100	0	20.198	18.657	1.540,98	8,26	2.231	45,06	41,63	3,43	8,23
4	50	0	20.202	18.657	1.544,63	8,28	2.231	45,07	41,63	3,44	8,25
5	51	0	20.227	18.657	1.569,77	8,41	2.231	45,13	41,63	3,49	8,39
6	13	0	20.158	18.657	1.501,28	8,05	2.231	44,97	41,63	3,34	8,02
7	99	0	20.084	18.657	1.426,69	7,65	2.231	44,81	41,63	3,17	7,62
8	74	0	20.229	18.657	1.572,19	8,43	2.231	45,13	41,63	3,50	8,40
9	176	1	20.245	18.657	1.587,70	8,51	2.231	45,17	41,63	3,53	8,48
10	128	0	20.116	18.657	1.458,57	7,82	2.231	44,88	41,63	3,24	7,79
11	152	1	20.212	18.657	1.555,46	8,34	2.231	45,09	41,63	3,46	8,31
12	179	1	20.245	18.657	1.588,47	8,51	2.231	45,17	41,63	3,53	8,49
13	157	1	19.954	18.657	1.296,89	6,95	2.231	44,52	41,63	2,88	6,92
14	105	0	20.067	18.657	1.409,69	7,56	2.231	44,77	41,63	3,13	7,53
15	41	0	20.001	18.657	1.344,19	7,20	2.231	44,62	41,63	2,99	7,18
16	96	0	20.189	18.657	1.531,77	8,21	2.231	45,04	41,63	3,41	8,18
17	50	0	20.267	18.657	1.610,16	8,63	2.231	45,22	41,63	3,58	8,60
18	35	0	20.044	18.657	1.386,68	7,43	2.231	44,72	41,63	3,08	7,41
19	123	0	20.195	18.657	1.537,75	8,24	2.231	45,05	41,63	3,42	8,22
20	10	0	20.215	18.657	1.557,71	8,35	2.231	45,10	41,63	3,47	8,32
Média			20.134		1.477,14	7,92		44,92		3,29	7,89
Desv. Padrão			116,16		116,16	0,62		0,26		0,26	0,62

Tabela 19 - Resultados obtidos com o sensor Kinect® para a formulação 07-11-09.

Frame	Erosão do Quadro		Volume Calculado	Volume Real	Diferença Volume Calculado/Real		Densidade	Massa Calculada	Massa Real	Diferença Massa Real / Calculada	
	pixel	%	mm ³	mm ³	mm ³	%	g/cm ³	g	g	g	%
1	7	0	25.162	21.957	3.205,14	14,60	1.766	44,44	40,54	3,90	9,62
2	111	0	25.024	21.957	3.066,64	13,97	1.766	44,19	40,54	3,65	9,02
3	97	0	25.027	21.957	3.070,47	13,98	1.766	44,20	40,54	3,66	9,03
4	116	0	25.077	21.957	3.119,95	14,21	1.766	44,29	40,54	3,75	9,25
5	103	0	25.162	21.957	3.204,77	14,60	1.766	44,44	40,54	3,90	9,62
6	92	0	25.086	21.957	3.128,57	14,25	1.766	44,30	40,54	3,76	9,29
7	177	1	25.007	21.957	3.050,39	13,89	1.766	44,16	40,54	3,63	8,95
8	162	1	25.079	21.957	3.121,56	14,22	1.766	44,29	40,54	3,75	9,26
9	155	1	25.046	21.957	3.088,62	14,07	1.766	44,23	40,54	3,69	9,11
10	144	1	25.043	21.957	3.085,80	14,05	1.766	44,23	40,54	3,69	9,10
11	104	0	25.044	21.957	3.087,42	14,06	1.766	44,23	40,54	3,69	9,11
12	148	1	25.059	21.957	3.102,23	14,13	1.766	44,25	40,54	3,72	9,17
13	115	0	25.028	21.957	3.071,22	13,99	1.766	44,20	40,54	3,66	9,04
14	120	0	25.017	21.957	3.060,32	13,94	1.766	44,18	40,54	3,64	8,99
15	121	0	25.046	21.957	3.089,23	14,07	1.766	44,23	40,54	3,69	9,11
16	104	0	25.075	21.957	3.118,18	14,20	1.766	44,28	40,54	3,75	9,24
17	143	1	25.022	21.957	3.064,84	13,96	1.766	44,19	40,54	3,65	9,01
18	102	0	25.088	21.957	3.131,34	14,26	1.766	44,31	40,54	3,77	9,30
19	95	0	25.095	21.957	3.137,86	14,29	1.766	44,32	40,54	3,78	9,33
20	96	0	25.115	21.957	3.158,27	14,38	1.766	44,35	40,54	3,82	9,42
Média			25.065		3108,14	14,16		44,27		3,73	9,20
Desv. Padrão			44,26		44,26	0,20		0,08		0,08	0,19

Os resultados do teste com a formulação 03-17-00 com óleo foram os mais precisos entre os fertilizantes estudados (Tabela 20). Os resultados dos cálculos de massa alcançaram média de 1,74% de erro em relação ao valor real. Isso representou diferença de 0,43 g e desvio padrão de 0,20. Essa maior precisão deve ter sido ocasionada pelas características do fertilizante. Essa formulação possui recobrimento com óleo para evitar a formação de pó. Esse recobrimento beneficiou as leituras obtidas pelo sensor, pois deixou o fertilizante com um aspecto opaco, com pouca refletância de luz. Nessas condições, o sensor obtém melhores leituras do padrão de disparidade e os cálculos das distâncias de profundidade se tornam mais precisos. Além do recobrimento com óleo, o fertilizante aparenta ser um material mais bem elaborado. Percebe-se, mesmo visualmente, um padrão uniforme no formato e no tamanho dos grânulos, além de ausência de pó na amostra. Comparado com as outras amostras estudadas percebe-se grande diferença nesse aspecto.

Tabela 20 - Resultados obtidos com o sensor Kinect® para a formulação 03-17-00 com óleo.

Frame	Erosão do Quadro pixel	%	Volume Calculado mm ³	Volume Real mm ³	Diferença Volume Calculado/Real mm ³	%	Densidade g/cm ³	Massa Calculada g	Massa Real g	Diferença Massa Real / Calculada g	%
1	146	1	14.747	14.896	-148,66	-1,00	2.057	30,34	30,64	-0,30	-0,99
2	222	1	14.805	14.896	-91,18	-0,61	2.057	30,45	30,64	-0,19	-0,61
3	34	0	14.884	14.896	-12,04	-0,08	2.057	30,62	30,64	-0,02	-0,07
4	90	0	14.861	14.896	-34,62	-0,23	2.057	30,57	30,64	-0,07	-0,23
5	154	1	14.719	14.896	-177,23	-1,19	2.057	30,28	30,64	-0,36	-1,18
6	127	0	14.597	14.896	-298,53	-2,00	2.057	30,03	30,64	-0,61	-2,00
7	216	1	14.766	14.896	-129,77	-0,87	2.057	30,37	30,64	-0,26	-0,86
8	169	1	14.797	14.896	-99,50	-0,67	2.057	30,44	30,64	-0,20	-0,66
9	150	1	14.737	14.896	-159,43	-1,07	2.057	30,31	30,64	-0,33	-1,06
10	118	0	14.617	14.896	-278,96	-1,87	2.057	30,07	30,64	-0,57	-1,87
11	205	1	14.608	14.896	-287,78	-1,93	2.057	30,05	30,64	-0,59	-1,93
12	82	0	14.709	14.896	-186,85	-1,25	2.057	30,26	30,64	-0,38	-1,25
13	168	1	14.616	14.896	-280,28	-1,88	2.057	30,06	30,64	-0,57	-1,87
14	125	0	14.597	14.896	-298,80	-2,01	2.057	30,03	30,64	-0,61	-2,00
15	97	0	14.634	14.896	-261,55	-1,76	2.057	30,10	30,64	-0,54	-1,75
16	134	0	14.609	14.896	-287,46	-1,93	2.057	30,05	30,64	-0,59	-1,92
17	95	0	14.595	14.896	-301,29	-2,02	2.057	30,02	30,64	-0,62	-2,02
18	118	0	14.638	14.896	-257,60	-1,73	2.057	30,11	30,64	-0,53	-1,72
19	103	0	14.597	14.896	-298,61	-2,00	2.057	30,03	30,64	-0,61	-2,00
20	188	1	14.606	14.896	-290,05	-1,95	2.057	30,04	30,64	-0,59	-1,94
Média			14.687		-209,01	-1,40		30,21		-0,43	-1,40
Desv. Padrão			96,14		96,14	0,65		0,20		0,20	0,65

5.7 RESULTADOS DO EXPERIMENTO EM ESTEIRA

Os resultados dos experimentos em esteira foram separados de acordo com a presença do dosador *Fertisystem* na rosca do sistema de distribuição. Na Tabela 21, com o dosador *Fertisystem*, e na Tabela 22, sem o dosador *Fertisystem*, são apresentados os resultados de percentual de erro de disparidade corrigido, total de massa medida sobre a esteira, média da massa calculada para cada quadro, desvio padrão da massa calculada, a quantidade calculada para um metro linear da esteira, o valor real da amostra coletada e a diferença entre a massa calculada e da amostra, considerando as leituras de cada repetição. Destaca-se que, para essa avaliação, utilizou-se apenas a formulação 03-17-00 com óleo.

Comparando-se os resultados das Tabelas 21 e 22 observa-se que houve diferenças entre as massas medidas nas leituras da esteira com o *Fertisystem* e sem o dosador acoplado. A maior quantidade de fertilizante depositada na esteira sem o dosador *Fertisystem* foi observada nas leituras do sistema e comprovada na pesagem das amostras. Outro fato relevante foi a maior regularidade e o menor desvio padrão obtidos nas três repetições com o dosador *Fertisystem* acoplado.

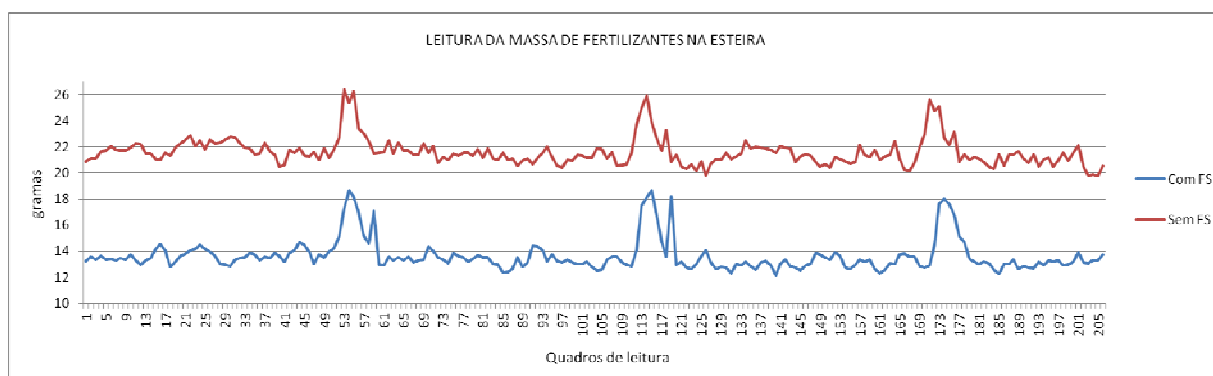
Tabela 21 - Leituras da formulação 03-17-00 com óleo na esteira com o dosador *Fertisystem*.

Rep.	Correção	Total	Media	Desvio Padrão	Massa calculada	Massa real	Diferença	
	%	g	g/10 cm	g/ 10 cm	g / m	g / m	g	%
1	0	2.408,82	13,26	0,52	132,60	135,13	2,53	1,87
2	0	2.407,18	13,27	0,51	132,67	135,13	2,46	1,82
3	0	2.406,69	13,27	0,51	132,67	135,13	2,46	1,82
Média		2.407,56	13,26	0,51	132,64	135,13	2,49	1,84

Tabela 22 - Leituras da formulação 03-17-00 com óleo na esteira sem o dosador *Fertisystem*.

Rep.	Correção	Total	Media	Desvio Padrão	Massa calculada	Massa real	Diferença	
	%	g	g/10 cm	g/ 10 cm	g / m	g / m	g	%
1	0	3.864,76	21,36	0,65	213,61	217,36	3,75	1,73
2	0	3.865,32	21,37	0,65	213,70	217,36	3,66	1,68
3	0	3.857,33	21,32	0,63	213,20	217,36	4,16	1,91
Média		3.862,47	21,35	0,64	213,50	217,36	3,86	1,77

O valor “Total” corresponde a 181 leituras, com 10 cm cada uma, na passagem da esteira. No total foram capturadas 206 leituras consecutivas, mas algumas anomalias precisaram ser desconsideradas na montagem das Tabelas 21 e 22. Na Figura 41 estão apresentados, em forma gráfica, os resultados das leituras da 3ª repetição do experimento. Observa-se que ocorreram alguns ressaltos nas leituras em forma de pulsos e com uma frequência aparentemente regular. Esses pulsos, na realidade, foram sobressaltos na espessura da esteira, resultantes de sua junção. Tais anomalias precisaram ser desconsideradas, pois poderiam criar um efeito de “outliers” e influenciar negativamente os resultados. Assim, para a montagem das Tabelas 21 e 22 foram removidos os “outliers”, reduzindo o número de quadros de captura para 181.

Figura 41 - Leitura da massa da formulação 03-17-00 com óleo na esteira, sem e com o dosador *Fertisystem*.

Os resultados das leituras da 3ª repetição do experimento após a eliminação dos “outliers” estão apresentados na Figura 42. Nota-se que houve melhoria na observação do comportamento das leituras de massa do material sobre a esteira, mostrando que o sensor Kinect® pode ser utilizado para medir a regularidade na distribuição de fertilizantes sólidos em esteira. Para isso, seria importante a utilização de esteira completamente lisa e sem alterações em sua espessura.

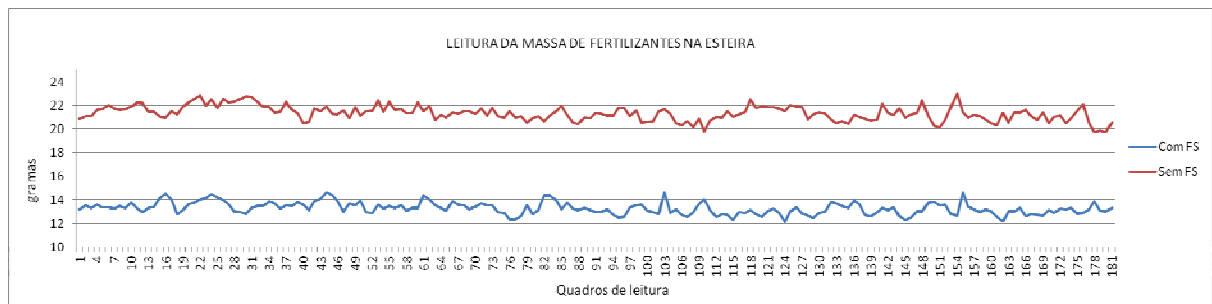


Figura 42 - Leitura da massa da formulação 03-17-00 com óleo na esteira, sem e com o dosador *Fertisystem*, após eliminação de outliers.

6 CONCLUSÕES

Por se tratar de equipamento baseado em um projetor de infravermelhos e um sensor receptor, os resultados desse trabalho mostraram que alguns fatores do ambiente diminuem a qualidade dos dados obtidos pelo Kinect[®]. As variações do ambiente, como iluminação solar e excesso de iluminação, bem como as superfícies dos materiais influenciam na resposta do sensor, sendo fundamental utilizá-lo em ambiente controlado para a obtenção de dados mais seguros. Mesmo em ambientes controlados, o sensor pode apresentar pequenas variações nas leituras e algumas falhas na detecção da distância de alguns pixels.

O sistema desenvolvido mostrou-se eficiente no tratamento e correções de erros e desvios dos dados do sensor, possibilitando obter leituras precisas de objetos de pequenas dimensões e em experimentos com diferentes fertilizantes minerais.

Os experimentos com fertilizantes sólidos mostraram que a superfície dos materiais influenciou a resposta do sensor, tendo-se obtido eficiência de 98,60% para o melhor caso (formulação 03-17-00 com óleo) e de 85,14% para o pior caso (sulfato de amônio). Além disso, outros fatores como compactação, acomodação e forma dos grânulos dos fertilizantes também devem ser considerados porque influenciam a eficiência do sensor.

Os experimentos com esteira em movimento revelaram que a precisão se manteve acima de 98%, demonstrando que o sistema é capaz de obter leituras muito próximas da realidade. Nesse caso, destaca-se que defeitos na espessura da esteira ocasionados por sua junção prejudicam a qualidade dos resultados, enfatizando a necessidade de utilizar ambientes bem preparados para se obter resultados precisos.

O sensor Kinect[®] mostrou-se viável para auxiliar a avaliação da regularidade da distribuição de fertilizantes minerais sólidos, desde que sejam aplicadas as metodologias e as técnicas descritas e experimentadas neste estudo.

7 TRABALHOS FUTUROS

A realização deste trabalho demonstrou a capacidade de utilização do sensor Kinect® como “ferramenta” de precisão, com suas qualidades e limitações, para medir a regularidade na distribuição de fertilizantes minerais sólidos. O presente trabalho concentrou-se em obter leituras da massa dos fertilizantes minerais, mas adicionalmente apresentou estudo sobre a capacidade de identificar, com precisão, a composição das cores da sua superfície, por meio da câmera RGB presente no sensor. Tal capacidade pode ser utilizada para medir a segregação dos fertilizantes formulados em mistura de grânulos, no momento de sua aplicação, por meio da identificação da coloração das fontes de nutrientes constituintes da mistura.

Nos experimentos com fertilizantes minerais, os resultados mostraram que as melhores respostas ao sensor foram obtidas com a utilização de fertilizante mais bem elaborado e recoberto com óleo. Isso abre possibilidades para a realização de estudos com esse sistema para medir a qualidade dos fertilizantes fabricados. Estudos adicionais poderiam incrementar novos coeficientes para o cálculo da massa de fertilizantes, além da sua densidade, como compactação, grau de acomodação e espaçamento livre entre os grânulos, melhorando a precisão do sistema. O sensor Kinect® também poderia ser aplicado em estudos envolvendo a qualidade dos equipamentos de distribuição e aplicadores de fertilizantes, aferindo suas regulagens e dosagens.

Considerando a capacidade do sistema em detectar objetos de pequenas dimensões, várias outras abordagens poderiam ainda ser adotadas, como a utilização do Kinect® para estudos de espaçamento de sementes e de avaliação do comprimento radicular de plantas.

REFERÊNCIAS

ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES A. S. **Os adubos e a eficiência das adubações**. e. ed. São Paulo: ANDA, 1998. 35p (Boletim técnico, 3).

ANDA. **Estatísticas**, São Paulo 2012. Disponível em: <http://www.anda.org.br/index.php?mpg=03.00.00>. Acesso em: out. 2012.

BENGUIGUI, DANIEL SÁNCHEZ DEL ÁLAMO. **Time-Of-Flight Camera**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Informática, Universidade Carlos III de Madri, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10016/9699>. Acesso em: out. 2012.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Pecuária, **Instrução Normativa 5/2007**, Disponível em: (<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=detalharAtoArvore&tipo=INM&numeroAto=5&seqAto=000&valorAno=2007&orgao=MAPA&codTipo=&desItem=&desItemFim=&nomeTitulo=codigos>). Acesso em: out. 2012.

BRASIL, M. A. M.; VEIGA, R. A. A.; MELLO, H. A. **Densidade básica de madeira de Eucalyptus Grandis Hill ex Maiden, aos 3 anos de idade**. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais. IPEF n.19, p.63-76, dez.1979. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr19/cap05.pdf>. Acesso em: out. 2012.

BURRUS, Nicolas. **Kinect Calibration**. Disponível em: [http://nicolas.burrus.name/index.php/Research/Kinect[®] Calibration](http://nicolas.burrus.name/index.php/Research/Kinect%20Calibration) - ago 2011. Acesso em: out. 2012.

CORREA, C. F. **Algoritmos para la Planificación y Seguimiento de trayectorias de robots agrícolas**. Prêmio Gerdau Melhores da Terra. 25, out 2012. Disponível em: <http://www.gerdau.com.br/media-center/noticias.aspx?Codigo=dc86ddfd-10c6-4d79-824d-0af474f7f699>. Acesso em: out. 2012.

COSTA, P. J. C. G. **Operação Pick and Place Adaptativa em ambientes pouco Estruturado**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, dez. 2011. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~ee07159/doku.php?id=home>. Acesso em: out. 2012.

FELTRAN, J. C.; CORREA, J. C.; BRANCALÃO, S. R.; VILLAS BOAS, R. L. **Segregação física e química de fertilizantes formulados**, Científica, Jaboticabal, v.34, n.2, p.188-196, 2006.

FORSYTH, DAVID A; PONCE, JEAN. **Computer Vision : A Modern Approach**. Prentice Hall, 2003.

FRASER, Clive, REMONDINO, Fabio. **Digital camera calibration methods: Considerations and Comparisons**. IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden 25-27, set 2006. Disponível em: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part5/paper/REMO_616.pdf. Acesso em: out. 2012.

FREEDMAN, B., SHPUNT, A., MACHLINE, M., ARIELI, Y., 2010. **Depth mapping using projected patterns**. Prime Sense Ltd, United States. Departamento de Patentes dos Estados Unidos, mai 2010. Disponível em: <http://www.google.com.br/patents?hl=pt-BR&lr=&vid=USPATAPP12522171&id=-gzQAAAAEBAJ&oi=fnd&dq=Depth+mapping+using+projected+patterns.&printsec=abstract#v=onepage&q=Depth%20mapping%20using%20projected%20patterns.&f=false> . Acesso em: out. 2012.

GOETTEMS, J. M.; FEY, E; DOS REIS, G. Z; HOFFMAN, M.; MROZINSKI, C. **Distribuição Longitudinal de Fertilizantes em Sistemas Dosadores Helicoidais Modificados de Semeadoras**, In: IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA 2010 e XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2010, Vitória - ES, Brasil

GISH, J. K.; FEY, E.; COLOMBARI, L. F.; BERTALUZI, D. R.; SCHWENGBER, L. **Distribuição Longitudinal de Adubo com Diferentes Passos de Rosca do Dosador Helicoidal Comum de uma Semeadora**, In: IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA 2010 e XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2010, Vitória - ES, Brasil

IFDC. **Fertilizer Manual**, 1998. 3rd ed, Norwell-EUA: Kluwer Academic. 481p.

KHOSHELHAM, K. **Accuracy Analysis of Kinect Depth Data**. ITC Faculty of Geoinformation Science and Earth Observation, University of Twente. 2011. Disponível em: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/5-W12/Papers/ls2011_submission_40.pdf. Acesso em out. 2012.

MICROSOFT. **Xbox 360 + Kinect**, nov 2010. Disponível em: <http://www.xbox.com/pt-BR/Kinect>[®] . Acesso em: out. 2012.

MICROSOFT. **Kinect for Windows**, fev 2012. Disponível em: <http://www.microsoft.com/en-us/Kinectforwindows/>. Acesso em: out 2012.

MOLIN, José P.; MACHADO, T. M.; MAGALHÃES, R. P., FAULIN, G. D. **Segregação de fertilizantes aplicados a lanço**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.29, n.4, 2009.

VILLAROMAN , Norman; ROWE, Dale; SWAN, Bret. **Teaching Natural User Interaction Using OpenNI and the Microsoft Kinect Sensor**. Brigham Young University Provo, Utah, out 2011. Disponível em: <http://sigite2011.sigite.org/wp-content/uploads/2011/10/session14-paper02.pdf>. Acesso em: out. 2012.

VEZHNEVETS, Vladimir; VELIZHEV, Alexander; CHETVERIKOV, Nikita; YAKUBENKO, Anton. **GML Camera Calibration Toolbox**. Laboratório de Computação Gráfica e Multimídia – Departamento CMC do Estado de Moscou Lomonosov. Rússia, 2011. Disponível em: <http://graphics.cs.msu.ru/>. Acesso em: out. 2012.

OPENNI. OpenNI, nov 2010. **Biblioteca livre para o desenvolvimento da interoperabilidade de dispositivos de interação natural**. Disponível em: <http://www.openni.org/>. Acesso em: out. 2012.

PRIMESENSE, nov 2011a. **Primesense Natural Interaction**. Disponível em: <http://www.primesense.com>. Acesso em: out. 2012.

PRIMESENSE, nov 2011b. **The PrimeSensor (TM) Reference Design 1.08**. PrimeSense Ltd. Disponível em <http://www.primesense.com/en/technology>. Último acesso em out 2012.

PRIMESENSE, nov 2011c. **Our full 3d sensing solution**. PrimeSense Ltd. Disponível em <http://www.primesense.com/en/technology/115-the-primesense-3d-sensing-solution>. Acesso em: out. 2012.

RYDÉN, FREDRIK; CHIZECK ,HOWARD JAY, KOSARI, SINA NIA; KING, HAWKEYE; HANNAFORD. BLAKE. Using **Kinect TM and a Haptic Interface for Implementation of Real-Time Virtual Fixtures**. Computer Science & Enginee – Uneversity of Washington, 2011. Disponível em: http://www.cs.washington.edu/ai/Mobile_Robotics/rgbd-workshop-2011/camera_ready/ryden-rgbd11-Kinect®-haptics.pdf . Acesso em: out. 2012.

RODELLA, A. A.; ALCARDE, J. C. **Variabilidade na composição de misturas de fertilizantes decorrente de segregação e estimativa do efeito sobre a produtividade da cana-de-açúcar**. STAB: Açúcar, Alcool e Subprodutos, Piracicaba, v.13, p.14-19, 1994.

ROS. **Technical description of Kinect calibration**. Robotic Operating System. Creative Commons, 2010. Disponível em http://www.ros.org/wiki/Kinect®_calibration/technical. Acesso em: out. 2012.

TEIXEIRA, J. M.; REIS, B.; MACEDO, S; KELNER, J. **Uma avaliação estatística do problema de registro de imagens de profundidade usando o Kinect**. Centro de Informática Universidade Federal de Pernambuco, 2011. Disponível em: https://www.gprt.ufpe.br/grvm/Publication/FullPapers/2011/WRVA2011_Teixeiraetal.pdf. Acesso em: out. 2012.

TOMODO, WASHIO. **Experimental module to connect Kinect SDK to OpenNI**. Disponível em: <http://code.google.com/p/Kinect-mssdk-openni-bridge/>. Acesso em: nov. 2012.

TOSATO, J. M. T. **Segregação no transporte de fertilizantes comercializados em embalagens “BIG BAG”**, Dissertação de Mestrado em Agronomia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG, Ponta Grossa, 2006.

TRUCCO, E.; VERRI, A. **Introductory Techniques for 3-D Computer Vision**. Prentice-Hall, 1998.

ZHANG, ZHENGYOU. **A flexible new technique for camera calibration**. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 22(11):1330–1334, Novembro 2000. Disponível em: <http://www.johnloomis.org/ece595b/notes/CameraCalibration/readings/TR98-71.pdf> . Acesso em: out. 2012.

GLOSSÁRIO

Kinect [®]	Sensor da Microsoft
Feed	Formato de dados
Framework	Abstração que une códigos comuns entre vários projetos de Software provendo uma funcionalidade genérica.