UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
EMBRAPA INSTRUMENTAÇÃO

FRANCISCO DE ASSIS SCANNAVINO JUNIOR

Tomógrafo de espalhamento Compton para estudos da física de solos
agrícolas em ambiente de campo

São Carlos
2013

FRANCISCO DE ASSIS SCANNAVINO JUNIOR

Tomógrafo de espalhamento Compton para estudos da física de solos
agrícolas em ambiente de campo

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Física do Instituto de
Física de São Carlos da Universidade de
São Paulo.

Área de concentração: Física Aplicada
Opção: Física Computacional
Orientador: Prof. Dr. Paulo E. Cruvinel

Versão Corrigida
(Versão original disponível na Unidade que aloja o Programa)

São Carlos

2013

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

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço de Biblioteca e Informação do IFSC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Scannavino Junior, Francisco de Assis

Tomógrafo de espalhamento Compton para estudos da física de solos agrícolas em ambiente de campo / Francisco de Assis Scannavino Junior; orientador Paulo Estevão Cruvinel - versão corrigida -- São Carlos, 2013.
147 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada Computacional) -- Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

1. Tomógrafo Compton. 2. Física Computacional. 3. Densidade. 4. Solos. I. Cruvinel, Paulo Estevão, orient. II. Título.

À minha filhinha Anna Clara e à minha amada esposa Katia,
toda a minha admiração e gratidão pela compreensão,
carinho, presença e incansável apoio ao longo
da minha caminhada até a conclusão
desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, pelos desafios e dificuldades e pela sua constante presença em minha vida através da minha família, dos amigos e da “mãe” natureza.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo E. Cruvinel, que nos anos de convivência, muito me ensinou, contribuindo para meu crescimento científico e para o desenvolvimento deste projeto.

Ao Instituto de Física de São Carlos (IFSC), pela oportunidade de realização do meu curso de doutorado, aos seus funcionários da secretaria da pós-graduação Silvio C. Athayde, Ricardo V. Prado e Patrícia G. Ferreira, bem como às suas bibliotecárias Ana Mara M. C. Prado, Maria Neusa A. Azevedo e Maria Cristina C. Dziabas pela forma gentil, atenciosa e presteza que sempre me atenderam.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Aos meus pais Francisco A. Scannavino e Elmira C. Ferreira Scannavino, bem como aos meus irmãos Fábio L. F. Scannavino e Luciana F. Scannavino por todo o carinho, apoio e compreensão.

Ao meu cunhado e grande amigo, Kleber R. Felizardo que muito me ajudou com suas ideias, conhecimento técnico e inúmeras discussões importantes nesta pesquisa.

Ao grande amigo Nicola Bloise (*in memoriam*) pela amizade e longas conversas sobre o efeito Compton... Paz e bem, meu irmão!

À Embrapa Instrumentação, por colocar à disposição seus laboratórios e a todos os seus funcionários que me auxiliaram, especialmente ao Edilson Gabriel e a Ana Maria Felicori do Núcleo de Apoio à Programação (NAP), ao Luis A. Godoy da Oficina Mecânica e ao pesquisador Ladislau M. Rabello.

Aos meus ex-companheiros de sala Érica S. Tezuca, Ana Paula O. Santos, Leonardo C. Botega e Hugo N. Bendini, bem como aos meus atuais companheiros Heitor Mercaldi, Bruno S. Miyamoto, Victor Belletti, José M. G. Beraldo e Cristiane C. Gattaz pela amizade e companheirismo.

Ao meu grande amigo da computação Marcos A. Matos Laia pela sua grande amizade, auxílio nas disciplinas e nas reconstruções das imagens.

"Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa,
nunca tem medo e nunca se arrepende."
Leonardo da Vinci

RESUMO

SCANNAVINO JUNIOR, F. A. **Tomógrafo de espalhamento Compton para estudos da física de solos agrícolas em ambiente de campo**. 2013. 147 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

Este trabalho apresenta um novo tomógrafo de espalhamento de fótons por efeito Compton para estudos de solos agrícolas em ambiente de campo. O seu desenvolvimento está fundamentado na física computacional, em uma instrumentação nuclear avançada e nas técnicas do espalhamento Compton. O posicionamento lado a lado da fonte de raios X e do detector de estado sólido, operando em efeito Compton, viabiliza uma técnica não invasiva para aplicação direta em campo agrícola, não necessitando coleta de amostras e preservando as condições naturais do solo. Este tomógrafo Compton de campo possui um sistema de detecção baseado em fotodiodo de Silício (SDD - *Silicon Drift Detector*) com eficiência de detecção de 18,9% (@ 35 keV), módulo eletrônico de processamento de sinais de dimensões reduzidas (7,0x10,0x2,5 cm) e baixo consumo de energia elétrica (2,5 W). Outro aspecto relevante é a sua sonda de medida que viabiliza a coleta de projeções tomográficas, bem como o georeferenciamento que permite uma correta identificação da localização das análises. Resultados obtidos diretamente em um campo agrícola viabilizaram a obtenção de imagens tomográficas com resolução espacial 1x1 cm², faixa de abordagem de 10x10 cm², medidas densitométricas na faixa de 1,0 a 1,3 g/cm³ e energia de 37,8 keV, o que viabilizou medidas em profundidade de interesse agrícola.

Palavras-chave: Tomógrafo Compton. Física computacional. Densidade. Solos.

ABSTRACT

SCANNAVINO JUNIOR, F. A. **Compton scattering tomograph for agricultural soil physics studies in field environment.** 2013. 147 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

This research presents a new tomograph scattering of photons by the Compton Effect for studies of agricultural soils in a field environment. Its development is based on computational physics, in an advanced nuclear instrumentation and techniques of Compton scattering. The side by side position of X-ray source and solid-state detector, operating in the Compton Effect, enables a noninvasive technique for direct application in the agricultural field, without sampling and preserving the natural soil conditions. This field Compton tomograph has a detection system based on Silicon photodiode (SDD – Silicon Drift Detector) with detection efficiency of 18.9% (@ 35 keV), electronic module of signal processing with reduced dimensions (7.0 x 10.0 x 2.5 cm) and low power consumption (2.5 W). Another relevant aspect is its measuring probe that enables the acquisition of tomographic projections and its georeferencing that allows a correct identification of the analysis location. Results obtained directly in agricultural field enabled the achievement of tomographic images with spatial resolution of $1 \times 1 \text{ cm}^2$, range approach of $10 \times 10 \text{ cm}^2$, densitometric measurements in the range from 1.0 to 1.3 g/cm^3 and energy of 37.8 keV, which enabled in-depth measures of agricultural interest.

Keywords: Compton tomograph. Computational physics. Soil. Density.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Minitomógrafo Compton® em versão de laboratório para aplicações agrícolas ¹⁹	36
Figura 2- Escaneamentos longitudinais de um solo compactado e outro sem compactação ²²	38
Figura 3- Imagem Compton obtida com energia de 662 keV (a), na qual as intensidades são relacionadas à densidade e (b) obtida com energia de 60 keV, na qual os valores são relacionados à umidade do solo ²⁷	40
Figura 4- Exemplo de gráfico polar gerado pela ferramenta para variação do ângulo de espalhamento Compton versus o número de fótons espalhados $S(E)$ normalizado em função de elemento de volume dV e elemento de ângulo sólido $d\Omega$ ³⁹	45
Figura 5- Representação Esquemática do Efeito Compton. O fóton incidente de energia E_0 ao se chocar com o elétron desloca-o, perde parte de sua energia e muda a sua trajetória.	49
Figura 6- Diagrama de blocos do modelo para abordagem analítica na caracterização visual do efeito Compton.	54
Figura 7- Arranjo geométrico para experimentação com espalhamento Compton em ambiente de campo.	55
Figura 8- Diagrama esquemático da metodologia de análise com o uso da tomografia Compton em ambiente de campo.	58
Figura 9- Diagrama de blocos do sistema mecânico do tomógrafo Compton em ambiente de campo.	59
Figura 10- Disposição do gerador de alta tensão da fonte de raios X, laptop e GPS em uma maleta metálica de 76 cm x 54 cm x 23,5 cm e altura dos pés metálicos de 76 cm. As placas de circuito impresso se encontram abaixo do painel frontal da maleta.	59
Figura 11- Vista superior da mesa de posicionamento	60
Figura 12- Vista lateral da mesa de posicionamento.	61
Figura 13- Desenho esquemático e foto do gerador de raios X e detalhes da ampola.	62
Figura 14- Diagrama em blocos do sistema de detecção X-123SDD da Amptek®	63

Figura 15- Ilustração da tecnologia utilizada no Detector XR-100SDD da Amptek [®] (tradução da figura original em inglês).....	64
Figura 16- Resolução do detector de estado sólido (SDD) versus a energia para diferentes tempos de pico ⁵³	65
Figura 17- Resolução versus taxa de contagem com o detector de estado sólido (SDD) em função do tempo de pico, medido em 5,9 keV ⁵³	66
Figura 18- Eficiência versus a energia dos fótons incidentes para o detector de estado sólido SDD ⁵³ (1 mil = 0,0254 mm).....	66
Figura 19- Ilustração das etapas de operação do detector SDD da Amptek [®]	67
Figura 20- Diagrama em blocos da alimentação dos módulos eletrônicos e do fluxo de dados do tomógrafo Compton para uso ambiente de campo.....	69
Figura 21- Diagrama em blocos do módulo eletrônico do tomógrafo Compton para uso ambiente de campo.....	70
Figura 22- Curva de correlação entre a tensão de controle (Vc) e frequência (fv) do PLL 74HC4046, obtida experimentalmente.....	71
Figura 23- Circuito eletrônico de contagem e geração de pulsos da UCS.....	72
Figura 24- Circuito eletrônico de acionamento do GAT da UCS.....	73
Figura 25- Circuito eletrônico de supervisão do nível de tensão da bateria.....	73
Figura 26- Circuito eletrônico da fonte de 5V da unidade UCS.....	74
Figura 27- Foto da unidade eletrônica UCS.....	74
Figura 28- Esquema do circuito eletrônico da unidade UPC com os CIs L297 e L298.....	75
Figura 29- Sinais de controle dos motores de passo.....	76
Figura 30- Circuito eletrônico com os diodos de proteção contra tensão reversa da unidade UPC.....	77
Figura 31- Circuito eletrônico da unidade UPC.....	77
Figura 32- Diagrama em blocos do esquema geral do tomógrafo Compton para uso em ambiente de campo.....	80
Figura 33- Fluxograma da rotina do experimental do processo “on-line” do tomógrafo Compton de campo – Parte I.....	81

Figura 34- Fluxograma da rotina do experimental do processo “on-line” do tomógrafo Compton de campo – Parte II.....	82
Figura 35- Fluxograma da rotina do experimental do processo “on-line” do tomógrafo Compton de campo – Parte III.....	83
Figura 36- Fluxograma da rotina do experimental do processo “off-line” do tomógrafo Compton de campo.	84
Figura 37- Interface do software de medida do tomógrafo Compton de campo operando em plataforma do LabView®	86
Figura 39- Interface do software do sistema de detecção DppMCA do tomógrafo Compton operando em plataforma da Amptek®, ilustrando o espectro em energia do Amerício 241 versus a contagem de fótons em escala logarítmica.....	87
Figura 39- Projeção paralela de $f(x,y)$. O voxel de espalhamento Compton é formado pela interseção do campo de visão da fonte de raios X e do detector.	90
Figura 40- Diagrama esquemático da geometria de análise da correção da atenuação Compton.	93
Figura 41- Perfil da equação do fator de correção do efeito da posição do detector em relação ao solo.	95
Figura 42- Diagrama em blocos das operações matemáticas do algoritmo de retroprojeção filtrada.....	96
Figura 43- Saída gráfica para a avaliação da variação da distância percorrida pelo fóton Compton (x'_2) na amostra em função do ângulo de espalhamento Compton (θ).	102
Figura 44- Saída gráfica para a avaliação da variação do fator coeficiente de atenuação linear (cfat) em função do ângulo de espalhamento Compton (θ) em 50 keV.....	103
Figura 45- Saída gráfica para a avaliação da variação da secção de choque de Klein-Nishina em função do ângulo de espalhamento Compton (θ) nas energias de incidência de 10 keV, 50 keV e 100 keV.....	103
Figura 46- Saídas gráficas para a avaliação da variação da angular do espalhamento Compton (θ) com base na equação normalizada: (a) $E_0 = 50$ keV e $\Phi_0 = 15k$ e (b) $E_0 = 100$ keV e $\Phi_0 = 150k$	105
Figura 47- Saídas gráficas para a avaliação da variação da energética dos fótons incidentes (E_0) com base na equação normalizada para $\theta = 90^\circ$ e para faixa energética de E_0 de 40 a 100 keV: (a) $\Phi_0 = 1k$, (b) $\Phi_0 = 15k$ e (c) $\Phi_0 = 150k$	107

Figura 48- Saídas gráficas para a avaliação da variação do fluxo dos fótons incidentes (Φ_0) com base na equação normalizada para $\theta = 90^\circ$: (a) $E_0 = 10$ keV, (b) $E_0 = 50$ keV e (c) $E_0 = 100$ keV.....	110
Figura 49- Comparação das saídas gráficas produzidas com base na equação normalizada: (a) $E_0 = 100$ keV e $\Phi_0 = 150k$, (b) $\theta = 30^\circ$ e $\Phi_0 = 150k$ e (c) $E_0 = 100$ keV e $\theta = 30^\circ$	111
Figura 50- Foto dos sistemas de detecção X-123SDD e da fotomultiplicadora com os módulos de processamento de sinais.	114
Figura 51- Espectro obtido com o sistema de detecção X-123SDD da Amptek® ...	115
Figura 52- Espectro em energia do Amerício (^{241}Am) versus a contagem de fótons em escala logarítmica, utilizado na calibração do sistema de detecção X-123SDD.	117
Figura 53- Espectro dos fotopicos das energias Incidente e Compton com o eixo da contagem dos fótons em escala logarítmica.	118
Figura 54- Foto da disposição geométrica Compton em 90° utilizada para calibração em densidade.	119
Figura 55- Curva de calibração em densidade do Latossolo Roxo.....	120
Figura 58- Diagrama de sincronização adotado para as medidas das amostras de solo	121
Figura 57- Visualização do arquivo de dados 'dat' da matriz de projeções	122
Figura 58- Imagem tomográfica Compton da amostra de solo sem compactação em função da densidade em: (a) PseudoColor e (b) escala de cinza.	124
Figura 59- Imagem tomográfica Compton da amostra de solo com a 1ª compactação em função da densidade em: (a) PseudoColor e (b) escala de cinza.	125
Figura 60- Imagem tomográfica Compton da amostra de solo com a 2ª compactação em função da densidade em: (a) PseudoColor e (b) escala de cinza.	126
Figura 61- Foto aérea da Fazenda Canchim com as identificações dos sítios onde foram realizadas as medidas tomográficas Compton, obtidas pelo Google Maps.....	127
Figura 62- Foto do Sítio 1: área com presença de gramíneas com uma região onde o solo estava à amostra.	128

<i>Figura 63- Foto do Sítio 2: área de solo batido por servir de caminho de passagem de pessoas e veículos.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 64- Imagem tomográfica Compton do Sítio 1 em função da densidade em: (a) PseudoColor e (b) escala de cinza</i>	<i>130</i>
<i>Figura 65- Imagem tomográfica Compton do Sítio 2 em função da densidade em: (a) PseudoColor e (b) escala de cinza.</i>	<i>131</i>

LISTA DE SIMBOLOS

E_0	pico de energia de fótons incidentes [keV]
$K\alpha$	linha energética de emissão resultante da transição de um elétron da camada de valência L para a camada K em aplicações de espectroscopia de raios X [keV]
$K\beta$	linha energética de emissão resultante da transição de um elétron da camada de valência M para a camada K em aplicações de espectroscopia de raios X [keV]
E_C	pico de energia de fótons Compton [keV]
f	frequência de oscilação dos fótons de raios X [Hz]
p	momento dos fótons [m.g/s]
v	velocidade do fóton no meio [m/s]
E	pico de energia dos fótons espalhados [keV]
θ	ângulo de espalhamento Compton [°]
β	meio-ângulo de abertura do diâmetro do colimador do detector [°]
α	meio-ângulo de abertura do diâmetro do colimador da fonte [°]
ϕ	ângulo de espalhamento do elétron ejetado [°]
λ	comprimento de onda dos fótons de raios X [m]
h	constante de Planck ($\cong 6,626 \times 10^{-31}$) [m ² .g/s]
m_e	massa do elétron [g]
c	velocidade da luz no vácuo ($\cong 299,792 \times 10^6$) [m/s]
a	razão entre a energia E_0 e a energia de repouso do elétron
μ	coeficiente de atenuação linear [cm ⁻¹]
ρ	densidade física de um material [g/cm ³]
Z	número atômico de um elemento químico
I	intensidade de fótons [número de fótons]
x	distância percorrida pelo fóton [cm]
A	massa atômica do elemento químico [g]
N_A	número de Avogadro ($\cong 6,022 \times 10^{23}$) [mol ⁻¹]
δ_e	densidade eletrônica [g/cm ³ .mol]
σ_e^t	secção de choque total por elétron [cm ² /elétron]

σ^{KN}	secção de choque de Klein-Nishina [$\text{cm}^2/\text{fóton}$]
$\frac{d_e \sigma^{KN}(E)}{d\Omega}$	diferencial da secção de choque de Klein-Nishina [cm^2/sr]
r_0	raio clássico do elétron ($\cong 2,818 \times 10^{-13}$) [cm]
dV	diferencial do volume de interseção dos campos de visão da fonte e detector
$d\Omega$	diferencial do ângulo sólido associado à secção de choque de Klein-Nishina
dx	diferencial do comprimento linear dos percursos
x_1	comprimento linear dos percursos entre fonte e amostra [cm]
x_2	comprimento linear dos percursos entre amostra e detector [cm]
ε	eficiência do detector na região do fotopico [%]
Φ_0	fluxo de fótons incidentes [número de fótons/(s.cm ²)]
x'_1	percurso percorrido pelo fóton incidente dentro da amostra [cm]
x'_2	percurso percorrido pelo fóton espalhado dentro da amostra [cm]
KN	valor da secção de choque diferencial de Klein-Nishina [$\text{cm}^2/\text{fóton}$]
$cfat$	fator do coeficiente de atenuação linear
t	tempo de amostragem [s]
Z_{ef}	número atômico efetivo
A_m	massa molar [g]
Z_{1-4}	limites da interseção dos campos de visão da fonte e detector
lg	largura do porta amostra [cm]
cp	comprimento do porta-amostra [cm]
ls	comprimento da fonte de raios X [cm]
ld	comprimento do detector de raios X [cm]
Ds	diâmetro do colimador da fonte [cm]
Dd	diâmetro do colimador do detector [cm]
D_{SV}	distância entre fonte e centro do elemento de volume [cm]
D_{VD}	distância entre o centro do elemento de volume e detector [cm]
lz	distância entre o centro da amostra e a coordenada no eixo Z [cm]
O	centro do elemento de volume [cm]
Vc	tensão de controle do circuito integrado HEF4046BP (PLL) [V]
fv	frequência gerada pela tensão de controle do circuito integrado HEF4046BP (PLL) [Hz]

X0-3	portas de saídas da entrada X do circuito integrado HCF4052BE
Y0-3	portas de saídas da entrada Y do circuito integrado HCF4052BE
i	i-ésimo ângulo de rotação
j	j-ésima posição de translação
ξ	ângulo entre o solo e o detector ou ângulo de rotação [°]
$S_{\xi i}^c$	número de fótons que colidiram com o solo e se espalharam pelo Efeito Compton [fótons]
$\mu_1(s)$	coeficiente de atenuação linear do solo para a energia dos fótons incidentes [cm ⁻¹]
s'_1	caminho percorrido pelos fótons incidentes até o ponto de colisão com o elétron [cm]
$P_{\xi i}$	elemento do vetor com o número de fótons detectados no i-ésimo ângulo de rotação ξ_i ($i=1,2,\dots,k$) e na j-ésima posição de translação r_j ($j=1,2,\dots,p$)
p	número total de medidas em um determinado ângulo ξ_i
$\mu_2(s)$	coeficiente de atenuação linear ao longo do percurso espalhamento-detector [cm ⁻¹]
$S_{\xi i}^r$	número de fótons detectados efetivamente no i-ésimo ângulo de rotação ξ_i ($i=1,2,\dots,k$) e na j-ésima posição de translação r_j ($j=1,2,\dots,p$) [número de fótons]
r	variável de correlação entre os eixos de coordenadas (r,s) e (x,y)
P	número total de translações da projeção
q	fator de simetria da função exponencial
k	incremento que é somado ao valor medido $S_{\xi i}^r(r_j)$
z	cateto oposto ao ângulo φ do triângulo retângulo ABC
w	cateto adjacente ao ângulo φ do triângulo retângulo ABC
b	hipotenusa do triângulo retângulo ABC
φ	ângulo formado entre o cateto w e a hipotenusa b
g	cateto adjacente ao ângulo ξ do triângulo retângulo ABD
n	cateto oposto ao ângulo ξ do triângulo retângulo ABD
m	cateto adjacente ao ângulo φ do triângulo retângulo BCD
e	distância entre os pontos B e E

d	distância entre os pontos E e C
F_c	fator de correção do efeito da posição do feixe em relação ao solo
$N(\xi, r)$	matriz de projeções em função do ângulo de rotação ξ e posição de translação r
$f(x, y)$	imagem tomográfica
R_ξ	transformada de Fourier da projeção P_ξ
Q_ξ	projeção filtrada de R_ξ
$h(r)$	Resposta ao impulso do filtro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	Contextualização	27
1.2	Estado da Arte	28
1.3	Estado da Técnica	46
1.4	Objetivos.....	46
2	INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO IONIZANTE COM A MATÉRIA	47
3	DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO DO TOMÓGRAFO COMPTON DE CAMPO	53
3.1	Simulação Computacional do número de fótons espalhados pelo efeito Compton	53
3.2	Ótica de raios X e Arquitetura Mecânica	57
3.3	Sistema Eletrônico e de Medida	62
3.3.1	A fonte de raios X	62
3.3.2	O Sistema de Detecção de Raios X	63
3.3.3	Módulos Eletrônicos de Controle e Automação	68
3.3.3.1	Unidade de Comunicação e Sinais - UCS	70
3.3.3.2	Unidade de Potência e Conversão de Sinais - UPC.....	75
3.3.3.3	Sistema de Posicionamento (SPM) e Sensores (SIF)	78
3.3.3.4	Módulo de Aquisição de Dados (DAQ) e Gerador de Alta Tensão para a Fonte de Raios X (FAT)	78
3.4	Automação e aquisição de dados.....	79
3.5	Algoritmo de Correção da Matriz de Projeções e Reconstrução de Imagens.....	88
3.5.1	Equacionamento do Efeito Compton	88
3.5.2	Inclusão do Fator de Correção Devido à Absorção	91
3.5.3	Inclusão do Fator de Correção do Efeito da Posição do Feixe em Relação ao Solo	91
3.5.4	Inclusão do Fator de Correção do Efeito da Posição do Detector em Relação ao Solo	92
3.5.5	A Reconstrução das Imagens.....	96
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CALIBRAÇÃO EM DENSIDADE DE SOLOS	101

4.1	Resultados da Simulação Computacional.....	101
4.2	Obtenção de Fotopicos Compton.....	113
4.3	Calibração em Densidade para Solos Agrícolas.....	116
4.4	Tomografia Compton: Amostras de solo.....	120
4.5	Tomografia Compton: Medida de campo com Latossolo Roxo.....	127
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	133
	REFERÊNCIAS	135
	APÊNDICES	141
	APÊNDICE A- VISTA LATERAL DA MESA POSICIONADORA	143
	APÊNDICE B- CIRCUITO ELETRÔNICO DA UNIDADE DE COMUNICAÇÃO E SINAIS (UCS).....	145
	APÊNDICE C- CIRCUITO ELETRÔNICO DA UNIDADE DE POTÊNCIA E CONVERSÃO DE SINAIS (UPC).....	147

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A compactação do solo é um processo no qual o solo perde grande parte de sua porosidade, aumentando a densidade de seu particulado. Em se tratando de solos agrícolas, o maquinário agrícola, o pisoteio de animais e até mesmo o impacto das gotas das chuvas no solo contribuem na compactação deste¹. A compactação pode prejudicar a produção agrícola, pois oferece resistência ao crescimento radicular das plantas, redução da infiltração de água e solutos no solo e erosão hídrica, prejudicando desta forma a nutrição das plantas.

Técnicas de precisão na agricultura têm sido utilizadas para encontrar diagnósticos para a compactação de solos agrícolas. Uma técnica não invasiva que tem encontrado grande aplicação na análise de problemas que ocorrem nos solos é a Tomografia Computadorizada (TC) de raios X e de raios γ . A tomografia é uma técnica de imageamento que divide um objeto e organiza-o em seções de imagens paralelas e espacialmente consecutivas (cortes axiais). A palavra tomografia tem origem grega e é formada pelos termos *tomos* que significa “parte” ou “seção” e o termo *graphein* que significa “escrever” ou “registrar”. O equipamento utilizado na tomografia é denominado de tomógrafo e a imagem obtida denominada de imagem tomográfica ou simplesmente de tomograma.

A técnica tomográfica possibilita visualizar imagens bi e tridimensionais da estrutura interna de um objeto de maneira não destrutiva. Para tal, utiliza medidas de atenuação da radiação nas matérias, nas quais os objetos são compostos. Essa atenuação envolve fenômenos físicos tais como o efeito fotoelétrico e os espalhamentos Rayleigh e Compton.

Atualmente, as pesquisas utilizam uma nova instrumentação tomográfica para agricultura baseada em espalhamento Compton, que pode ser utilizada para medidas simultâneas da densidade e da compactação de solo. A tomografia Compton permite o imageamento espacial das densidades eletrônicas de uma amostra, o que a torna uma importante ferramenta de diagnóstico em diversas áreas de pesquisa.

A principal vantagem da tomografia Compton está no fato da fonte e detector estarem posicionados ao mesmo lado, no imageamento parcial do objeto, na acessibilidade e na reduzida necessidade computacional para a reconstrução das imagens. Todavia, as pesquisas com o imageamento por espalhamento Compton ainda enfrentam desafios como as incertezas sistemáticas devido à atenuação do feixe incidente e do espalhado, a contribuição de múltiplos espalhamentos de fótons ao sinal útil e a contribuição do volume de espalhamento no qual o sinal é derivado.

1.2 ESTADO DA ARTE

A Tomografia Computadorizada (TC) é a modalidade tomográfica mais antiga e surgiu da união da física de raios X, de detectores de fótons e da teoria matemática de reconstrução de imagens. A metodologia matemática utilizada nesta técnica foi publicada primeiramente em 1917 pelo austríaco Johann Radon². Através do teorema matemático desenvolvido por Radon, hoje é possível obter projeções tomográficas que são definidas através de integrais de linha que podem ser apresentadas na forma de uma transformada. Tal transformada foi denominada de Transformada de Radon. Em 1963, Allan M. Cormack publicou a representação de uma função que determinava o coeficiente de absorção dos raios X e determinava da variável de densidade da matéria com composição química constante³. Todavia, somente em 1969, Cormack tomou conhecimento do trabalho de Radon. Em 1973, Godfrey N. Hounsfield, engenheiro da EMI Ltd, publicou a descrição dos sistemas para o escaneamento axial transversal e computadorizado, através do protótipo de um tomógrafo⁴.

Em 1978, Sherman e colaboradores analisaram a dispersão espacial de fótons devido ao espalhamento Compton para estudarem a redução do contraste de imagens tomográficas obtidas pela CAT em tecidos humanos e a relação sinal/ruído resultante de erro de leitura pela posição dos detectores de Germânio⁵ (Ge). Os autores utilizaram uma fonte de raios gama de 140 keV de energia (^{99m}Tc) e dois detectores discretos de Ge(Li) acoplados, denominados de detector sensível à posição (*Position-Sensitive Detector* – PSD) e detector de espalhamento (*Detector Scatter* – DS). A justificativa dada para a utilização do Ge para a confecção dos detectores foi a propriedade deste de rejeitar virtualmente todos os fótons que

espalham em um tecido, melhorando o contraste da imagem obtida. Adicionalmente, eles explicaram que um detector PSD somente fornecia uma correta leitura quando um fóton incidente era totalmente absorvido por sua célula. Porém, quando um fóton era espalhado para fora da célula na qual ele incidiu e era absorvido em outra célula, boa parte de sua energia era dissipada na segunda célula, gerando uma leitura errônea. As medidas de espalhamento foram feitas com um detector coaxial de Ge(Li) com 40 mm de diâmetro ativo por 22 mm de comprimento, no qual oito fendas (posicionadas a 45° entre si) de aproximadamente 1 mm de largura por 3 mm de profundidade foram cortadas através de contatos externos. Os resultados obtidos pela metodologia demonstraram um aumento de 20 a 30% em relação aos detectores de Iodeto de Sódio (NaI) e tanto o espalhamento como objetos que geram baixos contrastes reduziam a relação sinal/ruído através da diminuição da eficiência do imageamento por um fator maior que 2 quando o contraste variava de 0,50 a 0,25. Os autores concluíram que a degradação no contraste da imagem, devido ao espalhamento Compton, podia ser reduzida se fossem utilizados detectores finos (~ 5 mm), no qual o espalhamento virtualmente não existia, ou se fossem utilizados detectores espessos. Adicionalmente, evidenciaram que, para se extrair o potencial máximo dos detectores de Ge, estes deveriam estar arranajados discretamente na forma de uma matriz de varredura, na qual a leitura não seria afetada pelo espalhamento.

Em 1983, Singh e Doria investigaram algoritmos iterativos para reconstrução de imagens através de um novo tipo de câmera de radiação gama baseada em um método eletrônico de colimação⁶. A detecção da radiação foi baseada em dois sistemas formados por: (i) uma matriz de varredura de 33x33 detectores de Ge de alta pureza que foi acoplada (ii) a uma câmera de cintilação convencional e não colimada de Iodeto de Sódio⁷ (NaI). A contagem simultânea entre os dois sistemas, em concordância com a cinemática do espalhamento Compton, determinava a localização da atividade através da posição e resolução em energia dos detectores. A reconstrução das imagens foi realizada em dois estágios. No primeiro foram reconstruídas as imagens de projeção de linha cônica (visão cônica do feixe), como vistas por cada elemento sensível a posição da matriz de varredura, e no segundo as imagens tomográficas propriamente ditas. Três processos iterativos foram utilizados: a Técnica de Reconstrução Iterativa Simultânea (TRIS), a Técnica de Reconstrução Algébrica (TRA) e o Método dos Mínimos Quadrados Iterativos

(MMQI). Os processos eram executados até o critério de convergência ser atingido. No primeiro estágio, a TRIS atingiu a convergência com 20 iterações, a TRA com 5 iterações e a MMQI com 20 iterações. Portanto, a técnica que apresentou melhor desempenho foi a TRA. No segundo estágio, a TRIS atingiu a convergência com 10 iterações, a TRA com 5 iterações e a MMQI com 10 iterações. Os autores concluíram que a TRA foi a que apresentou o melhor desempenho em ambos os estágios.

Nos anos de 1988 e 1989, Hanson, Gigante e colaboradores desenvolveram um método matemático para visualizar a geometria de espalhamento da distribuição de energia e da variação angular do espalhamento Compton⁸⁻⁹. Os autores, ignorando os efeitos de absorção, obtiveram superfícies toroidais de ângulo constante e energia constante de espalhamento em sua forma. Adicionalmente, ressaltaram a importância da observação dos contornos de energia dentro de um volume espalhado, pois estes determinavam a magnitude dos efeitos geométricos. Eles também evidenciaram que este tipo de análise seria útil como uma abordagem analítica de medidas com raios X através de fótons espalhados e que era importante entender os fotopicos Compton para se obter acurácia nas medidas.

Em 1992, Cesareo e coautores publicaram um artigo sobre a fundamentação teórica e as aplicações em técnicas que utilizavam a interação de fótons com energia na faixa de keV com a matéria¹⁰. Entre as aplicações analíticas estavam a densitometria Compton, medidas de perfil Compton e medidas de razão entre espalhamento Rayleigh e espalhamento Compton (R/C). Sobre a densitometria Compton, os autores ressaltaram que este método de análise pode ser utilizado para determinar a densidade eletrônica da amostra, mas não a sua densidade de massa. Esta pode ser deduzida conhecendo-se o valor da razão Z/A (Z é o número atômico e A é a massa atômica) efetiva da amostra. Sobre as medidas de perfil Compton, eles relataram que a técnica era considerada uma importante fonte de informação sobre as modificações das distribuições do momento do elétron na amostra, porém a técnica tinha dificuldades nas medidas devido à presença da atenuação do feixe incidente e do múltiplo espalhamento. Sobre as medidas de razão (R/C), os autores reportaram trabalhos nos quais foi possível identificar um composto medindo a sua razão R/C, como exemplo, determinar a porcentagem de gordura no leite e na carne. Os autores concluíram que as pesquisas na área da interação dos raios X com a matéria precisariam ser bastante exploradas, tanto teoricamente como

experimentalmente, através do desenvolvimento de uma instrumentação mais sofisticada para imageamento e de técnicas analíticas.

Em 1993, Prettyman e colaboradores descreveram um método de visualização de composição e densidade de amostras industriais obtidas através de uma abordagem que combinava a tomografia de transmissão direta (TD) e um sistema de imageamento por espalhamento Compton¹¹. Os autores analisaram uma classe de instrumento que eles denominaram de medidor de espalhamento projetivo dispersivo de energia (EDPS – *Energy Dispersive Projective Scatterometer*). Para maximizar a sensibilidade do contraste, eles utilizaram uma fonte de raios gama de 662 keV (^{137}Cs), a técnica dos mínimos quadrados para abrir as projeções obtidas das respostas do EDPS e *phantoms* (corpos de prova) que continham diferentes materiais distribuídos discretamente (p. ex. Quartzo, polietileno, potássio, etc.). A distribuição dos materiais era dada por um raio interno e outro externo, pois estavam dispostos de forma concêntrica. Uma abordagem em duas fases foi desenvolvida para reconstruir as distribuições da densidade atômica efetiva e o número atômico efetivo de uma seção de um objeto usando projeções de TD e respostas do medidor de espalhamento. Na primeira fase, a distribuição do coeficiente de atenuação linear do objeto, cujos autores denominaram de imagem de referência, foi reconstruída de projeções de transmissão obtidas de um escâner usando uma fonte monoenergética. A imagem de referência provia uma relação única entre a densidade atômica efetiva e o número atômico efetivo em cada ponto da seção. Na segunda fase, as projeções de espalhamento eram lidas de um conjunto de medidas obtidas pelos medidores de espalhamento através da rotação do objeto. O efeito dos erros na imagem de referência no modo combinado foi examinado utilizando projeções de transmissão simuladas e as reconstruções seguintes eram baseadas nas imagens de referência geradas pela densidade atômica e número atômico dos *phantoms*. Os autores concluíram que os resultados teóricos obtidos por projeções construídas pelo método de Monte Carlo, bem como os resultados experimentais, mostraram boa concordância entre si e forneceram credibilidade aos parâmetros do modelo elaborado para a resposta da medida.

No mesmo ano, Balogun e Spyrou investigaram a influência que materiais de alto e de baixo número atômico Z exerciam nas imagens por tomografia Compton¹². Os autores utilizaram uma fonte de raios gama de 662 keV (^{137}Cs) com um colimador retangular (5 mm x 65 mm), um *phantom* que consistia de bloco de

alumínio (Al) cilíndrico de 52 mm de diâmetro e 5 buracos arranjados em uma circunferência de um círculo centrado no eixo do cilindro. Dois destes buracos foram de 12 mm de diâmetro enquanto os outros estavam na faixa de 5 e 6 cm de diâmetro. Os buracos foram feitos para serem inseridos bastões cuja composição química seria a de interesse da pesquisa. Em uma análise, os autores utilizaram um dos buracos de 6 mm de diâmetro para inserir um bastão de chumbo (Pb - alto Z) e, em uma outra, foi utilizado um buraco de 4 mm para inserção de um bastão de chumbo e um outro de 6 mm para um bastão de cobre (Cu – baixo Z). Os autores justificaram que este tipo de arranjo auxilia na análise do contraste e da relação sinal/ruído. Tal diferença devia ser no mínimo 60% para mais ou para menos em relação ao material de composição do *phantom*. Os melhores resultados de contraste, relação sinal/ruído e de precisão da medida foram obtidos para a inclusão do chumbo, como os autores esperavam. A mínima mudança detectável em densidade de massa foi de $4,2 \text{ g/cm}^3$.

Em 1994, Norton desenvolveu uma técnica de reconstrução de imagens tomográficas através do número de fótons espalhados como uma função da energia e do posicionamento do detector¹³. O autor utilizou um objeto hipotético e virtual com uma estrutura de alta densidade eletrônica para simular imagens reconstruídas em duas dimensões (2D) através de uma solução analítica. O resultado obtido foi uma imagem de densidade eletrônica que podia ser reconstruída através das medidas de suas integrais de linha sobre as várias sobreposições de caminhos circulares. Tal resultado apresentou uma solução analítica para o problema de reconstrução de imagem idealizada. Norton enfatizou que o método de retroprojeção (*back-projection*) tinha a vantagem de ser computacionalmente eficiente comparado a métodos baseados em inversão numérica de amplos sistemas de equações. Adicionalmente, o autor afirmou que o uso de técnicas como a de Monte Carlo tornava a simulação mais realística e que abordar a solução de forma iterativa era importante para a inserção da variação da atenuação no sistema de imageamento.

Em 1995, Arendtz e Hussein descreveram uma técnica para imagens tomográficas de densidade eletrônica usando o espectro de energia de raios gama espalhados por efeito Compton¹⁴. Um modelo de mapeamento de simples espalhamento foi construído para relacionar a densidade eletrônica à resposta do detector. Os autores também utilizaram simulações realizadas com o método de Monte Carlo para obter o espectro em energia do detector. Dois blocos quadrados

(50x50 mm²) de acrílico (*Lucite*) foram utilizados na simulação como *phantoms*, nos quais em um bloco continha duas inserções de alumínio (10x20 mm² e 5x10 mm²) e no outro bloco dois espaços vazios de mesmas dimensões. Tais materiais simularam tecidos biológicos, como o tecido ósseo (alumínio) e o tecido mole (*Lucite*). Os resultados obtidos pelos autores foram considerados muito bons, pois apresentaram as características da imagem com clareza, mesmo considerando um número limitado de projeções de espalhamento nas simulações.

Em 1996, Zhu e colaboradores descreveram suas experiências realizadas com a tomografia de espalhamento Compton utilizando um tubo de raios X industrial para o imageamento de materiais em 3D¹⁵. Entre as aplicações industriais descritas estavam medidas com imageamento 3D das paredes de carbono de uma asa de aeronave, medidas de espessura de materiais como um tanque cilíndrico feito de carbono e medidas de densidade de compostos químicos como o estearato de zinco (C₃₆H₇₀O₄Zn). Adicionalmente, os autores conseguiram identificar defeitos na estrutura da asa como delaminações presentes no meio da estrutura e vários destacamentos do revestimento. Para os resultados experimentais obtidos nas medidas de espessura, os autores consideraram uma incerteza de $\pm 2\sigma$ na qual obtiveram uma espessura de $10,98 \pm 0,01$ mm que foi comparada a um valor metrológico de $11,00 \pm 0,01$ mm. Para as medidas de densidade, os autores fizeram 150 medidas e obtiveram uma densidade média de 6,746 g/cm³ e um desvio padrão de 0,034 g/cm³. Os autores concluíram que as medidas realizadas com a tomografia de espalhamento Compton e outras técnicas que utilizam o mesmo espalhamento permitiam uma boa avaliação da caracterização de materiais industriais. Eles também reportaram que algumas dificuldades nas aplicações industriais se originavam do fato de algumas partes apresentarem largas dimensões, o que exigiam grandes suportes mecânicos para rotacionar tais objetos.

Em 1997, Harding publicou sobre o efeito Compton e suas aplicações na ciência biomédica e na indústria¹⁶. Além da transcrição dos fundamentos teóricos do efeito Compton, Harding comparou as principais características das técnicas de imageamento por espalhamento e transmissão de raios X. Ele escreveu que tais técnicas deveriam considerar as características mais significantes em cada área de aplicação. Na área da medicina era a dose de radiação emitida ao paciente para a visualização de uma determinada estrutura do corpo humano. Na área industrial as características eram as imperfeições no contraste, geometria da medida, velocidade

da inspeção e o custo do equipamento. Na área médica, o autor enfatizou que o imageamento por espalhamento possuía uma maior eficiência na dose de radiação para estruturas do corpo que fossem radiograficamente “finos” ($< 5\text{ cm}$), o que não atendia a maioria dos casos de diagnósticos médicos. Todavia, permitia obter imagens do pulmão e do coração em movimento e em tempo real, em contraste com a tomografia de transmissão que o tempo de escaneamento era limitado ($\sim 1\text{ s}$ por plano). Dentre as aplicações industriais, a grande vantagem do imageamento por espalhamento Compton estava na liberdade do posicionamento do detector, podendo este ser posicionado em qualquer posição desejada em relação à fonte de radiação e ao objeto. Harding citou exemplos de aplicações industriais em testes de corrosão nas fuselagens de aeronaves, em plataformas de satélite radar e em cúpulas de sonares, bem como, aplicações na área biomédica através de análises de processos de preservação de corpos mumificados.

Em 1999, Balogun apresentou um estudo numérico da variação dos ângulos de espalhamento e a influência desta variação no volume espalhado versus as distâncias do centro fonte-espalhamento, bem como diferentes tamanhos de colimadores¹⁷. O estudo revelou que existia certa simetria para uma faixa de valores de ângulo de espalhamento igual a $90 \pm 30^\circ$, porém um rápido aumento no volume de espalhamento foi observado na configuração com ângulos superiores a esta faixa para ambas as análises (distâncias fonte-espalhamento e tamanhos de colimadores). Adicionalmente, o autor demonstrou que para ângulos superiores a 120° , a resolução do volume decresceu rapidamente. Tal comportamento resultava em imagens tomográficas por efeito Compton de baixa qualidade tal como o aumento parcial do efeito de volume e a contribuição de eventos de múltiplo espalhamento.

Em 2000, Balogun e colaboradores apresentaram um método numérico para estimar o volume comum da interseção dos dois cones que representam o campo de visão da fonte e do detector¹⁸. Adicionalmente, eles compararam três métodos (i) um com escaneamento sequencial de um volume elemental, apresentado em forma de artigo no ano anterior, (ii) um método determinístico e (iii) um outro utilizando a técnica de Monte Carlo. Os autores concluíram que o uso da técnica de Monte Carlo provou ser mais eficiente no tempo de execução comparado com os outros dois métodos e que todos os três algoritmos convergiam em valores menores que 0,1% do valor médio.

No mesmo ano, Cruvinel e Balogun construíram um minitomógrafo de dupla energia para medidas de espalhamento Compton utilizado para aplicações na agricultura¹⁹. Uma foto do minitomógrafo Compton está ilustrada na Figura 1. O arranjo experimental consistia de duas fontes radioativas, uma de 662 keV (^{137}Cs) para medidas de densidade de solo e outra de 60 keV (^{231}Am) para medidas de conteúdo de água no solo. O tempo de contagem empregado para cada energia foi de 50 segundos por ponto amostrado na projeção com uma resolução espacial de 2 mm, totalizando 30 pontos amostrados por projeção e um total de 10 cm de deslocamento vertical. Os resultados apresentaram uma relação linear entre o tamanho dos agregados do solo e a medida Compton com coeficiente de regressão melhor que 0,95 para a densidade volumétrica e de 0,70 para o conteúdo de água. A densidade mínima detectada foi de 0,13 g/cm³ e 0,10 cm³/cm³ com precisão de 2% e 5%, respectivamente.

Em 2001, Cesareo e coautores projetaram e construíram um instrumento para medidas e imageamento de amostras com espalhamento de raios X²⁰. Através de dois tubos de raios X, um trabalhando em 50 kV e 1 mA e outro em 80 kV e 5 mA, bem como um detector de semicondutor (CdZnTe), os autores realizaram medidas de razão entre espalhamento Rayleigh e espalhamento Compton (R/C), medidas de perfil Compton e medidas tomográficas com o efeito Compton. Em relação às medidas tomográficas, o arranjo experimental empregou um detector posicionado a 90° do tubo de raios X de anodo W (80 kV – 5 mA) com um colimador de 4 cm de comprimento por 2 mm de diâmetro e um detector de semicondutor. Os autores compararam duas imagens tomográficas, uma por transmissão direta e outra por espalhamento Compton, de um *phantom* cilíndrico de Lucite de 20 mm de diâmetro com um cilindro de grafite de 6 mm em seu interior. As tomografias foram obtidas em 60 kV e 4 mA e as duas imagens obtidas apresentaram similaridades. Em relação às outras medidas (R/C e perfil Compton), os valores experimentais apresentaram conformidade com os teóricos.

Figura 1 - Minitomógrafo Compton® em versão de laboratório para aplicações agrícolas¹⁹.

Em 2002, Cesareo e colaboradores construíram um tomógrafo de primeira geração para medidas de fótons por espalhamento Compton²¹. O arranjo experimental empregava um tubo de raios X (80 kV - 5 mA) com colimação de 2 mm de diâmetro e um detector de NaI(Tl). Os autores ressaltaram que as principais vantagens obtidas pela tomografia Compton foram: (i) a realização medidas nas quais o objeto sob análise não era acessível em todas as direções e (ii) um bom contraste entre ar e material, pelo menos teoricamente. As desvantagens eram: (i) menor contagem de fótons devido ao ângulo sólido objeto-detector, necessitando-se de tubos de raios X de maior energia e (ii) múltiplo espalhamento no objeto, reduzindo a qualidade da imagem.

Em 2003, Balogun e Cruvinel aplicaram a tomografia Compton para analisar a compactação de solos agrícolas através de um minitomógrafo²². Nesse trabalho, os autores utilizaram uma amostra de solo com volume definido e, através do número de fótons detectados por espalhamento Compton, obtiveram imagens da distribuição de densidade do solo. O minitomógrafo empregava uma fonte de raios gama de 660 keV (^{137}Cs), a atividade no tempo de experimento era de 30 a 40 s por voxel, bem como a fonte e o detector utilizavam um colimador circular com 2 mm de diâmetro e um retangular de 2x4 mm, respectivamente. O sistema de contagem consistia de um detector de cintilação de NaI(Tl) de eficiência em energia na região de fotopico de 250 keV, um amplificador espectroscópico, um analisador monocanal (SCA) e um módulo contador/temporizador. As imagens tomográficas obtidas apresentaram bom

contraste de resolução, forma e definição de borda. Os autores ressaltaram que para se obter o aumento da eficiência de detecção de fótons assim como da resolução espacial necessitava de um colimador focalizador para parcialmente compensar a baixa secção de choque inerente do efeito Compton. Adicionalmente, eles reportaram que na tomografia com fótons de espalhamento Compton a escolha da energia de espalhamento era ditada pelo ângulo de espalhamento, materiais a serem examinados e o tamanho ou profundidade da amostra. Em algumas aplicações como análise de solos, conforme apresentado por esses autores, o uso de fótons de baixa energia (≤ 60 keV) era indicado para estudos de fenômenos superficiais, tal como o selamento do solo. Em situações que requerem informações de profundidade, tal como compactação do solo, fótons de energias superiores favoreciam a análise.

Na Figura 2 está ilustrada a avaliação da distribuição de densidade entre duas áreas de uma mesma amostra pela tomografia Compton, na qual primeiramente realizou-se uma medida com o solo descompactado e em seguida com o solo compactado através de uma pressão aplicada no centro da amostra. A análise dos níveis de compactação em diferentes profundidades foi possível por meio de um aparato mecânico que movimentava a amostra na direção vertical e mantinha a fonte e detector estáticos, possibilitando um escaneamento longitudinal desta.

Em 2004, Roy e Pratt compararam medidas de secção de choque de Klein-Nishina para todo o átomo (faixa de energia de 11 keV a 40 keV) com a teoria e utilizaram uma fonte de raios X do tipo *synchrotron*²³. As medidas de espalhamento Compton foram realizadas com um ângulo de espalhamento igual a 90°. Os resultados mostraram a comparação experimental das secções de choque medidas com fontes convencionais e *synchrotron* com os valores preditos do fator de espalhamento Compton (*Incoherent Scattering Factor* – ISF). As medidas realizadas com fontes convencionais foram apresentadas de forma dispersa, tendo uma diferença de magnitude do ISF na faixa de 5% a 50%, enquanto as medidas com o *synchrotron* caíram em uma estreita faixa de baixa porcentagem de diferença. Os autores ressaltaram a necessidade de trabalhos sobre medidas de espalhamento Compton na região abaixo de 10 keV para que se confirmasse a adequação do tratamento teórico além de um número maior de trabalhos com ângulos diferentes de 90° e diferentes valores de números atômicos Z em relação à faixa convencionalmente utilizada ($13 \leq Z \leq 82$).

Figura 2 - Escaneamentos longitudinais de um solo compactado e outro sem compactação²².

No mesmo ano, Söğüt e colaboradores investigaram a relação de dependência da intensidade de espalhamento Rayleigh e Compton (R/C) com o número atômico efetivo em moléculas em uma faixa de 22 a 92 e utilizando uma fonte de ^{241}Am de energia igual a 59,5 keV²⁴. Os autores obtiveram um erro total experimental relativo de 5% e observaram que a razão R/C foi diretamente proporcional ao aumento do número atômico efetivo. Adicionalmente, eles suspeitaram que a causa deste aumento pudesse estar relacionada aos efeitos da ligação eletrônica. Também em 2004, Rao e coautores obtiveram experimentalmente a secção de choque Compton para subcamadas de 12 elementos químicos (H, C, N, O, Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Fe), de interesse biológico, na faixa de energia de 5 keV a 10 MeV²⁵. Os autores reportaram que os dados gerados pelos experimentos poderiam ser utilizados em simulações de transporte de fótons na matéria e as secções de choque para o átomo completo, obtidas pela somatória dos dados das subcamadas. Adicionalmente, os resultados obtidos mostraram conformidade com os valores prévios.

Em 2005, Çonka-Nurdan e coautores desenvolveram um sistema de câmera Compton que consistia de um detector de estado sólido do tipo SDD (*Silicon Drift Detector*) e uma câmera gama (*Anger camera*) destinados ao estudo de eventos de coincidência e de rastreamento do elétron ejetado²⁶. Os autores esclareceram que um evento era considerado como coincidência quando um fóton emitido de uma fonte radioativa era primeiro espalhado pelo efeito Compton no SDD (no qual também o

elétron ejetado depositava sua energia) e o fóton espalhado sofria uma absorção fotoelétrica no cristal de NaI(Tl) da câmera gama. O equipamento foi projetado para que as medições pudessem ser realizadas em todas as orientações do detector e condições cinemáticas. O SDD era composto de uma matriz monolítica de 19 células hexagonais na qual cada célula semicondutora possuía um transistor (*on-chip*) que provia o primeiro estágio de amplificação. A fonte de radioisótopo (^{137}Cs) era finamente colimada para o estudo dos eventos que ocorriam em diferentes localizações no interior de uma única célula. Os resultados obtidos das medidas de posição e energia demonstraram que era possível reconstruir eventos Compton para distribuições com fonte monoenergética usando o SDD com excelente resolução em energia ainda que a energia do fóton espalhado fosse somente parcialmente absorvida. Os autores dissertaram que o sistema apresentado poderia ser melhorado através do uso de um número maior de SDD na função de espalhadores.

Em 2006, Cruvinel e Balogun apresentaram imagens tomográficas por espalhamento Compton para analisar a densidade e conteúdo de água em solos²⁷. Os autores utilizaram um arranjo experimental com duas fontes radioativas, uma com ^{137}Cs (662 keV) para medidas de densidade de solo e outra com ^{231}Am (60 keV) para medidas de teor de umidade do solo. O tempo de contagem empregado para cada energia foi de 50 segundos por ponto amostrado na projeção com uma resolução espacial de 2 mm, a total de 30 pontos amostrados por projeção e um total de 10 cm de deslocamento vertical. Os resultados quantitativos foram obtidos através de algoritmo de reconstrução que leva em conta a absorção de radiação incidente e espalhada. Estes autores compararam os valores dos coeficientes de atenuação linear, em medidas de densidade do solo, com a técnica Compton e a técnica de transmissão direta obtendo um fator de correlação de 0,81. Para medidas de conteúdo de água no solo, o fator de correlação obtido foi de 0,79, porém comparando a técnica Compton com a técnica de reflectometria no domínio do tempo (*Time Domain Reflectometry* - TDR). Na figura 3 estão ilustradas as imagens tomográficas reconstruídas a partir de medidas Compton utilizando energias (a) de 662 keV e (b) 60 keV. As imagens representam cortes longitudinais obtidas por escaneamento e coleta de dados em número de fótons do feixe espalhado e posteriormente reconstruídos.

Figura 3 - Imagem Compton obtida com energia de 662 keV (a), na qual as intensidades são relacionadas à densidade e (b) obtida com energia de 60 keV, na qual os valores são relacionados à umidade do solo²⁷.

No mesmo ano, Pašić e Ilakovac investigaram a função de espalhamento Compton pelo método da coincidência para elétrons de camadas mais externas²⁸. A técnica foi baseada na aplicação de dois detectores que operavam no modo de coincidência. Um detector foi utilizado como espalhador (alvo) e o outro como detector de radiação espalhada. Os autores explicaram que um evento de espalhamento Compton captado no detector espalhador gerava um pulso proporcional a energia que o fóton incidente depositava neste detector. Já no segundo detector, o fóton Compton secundário depositava sua energia remanescente. A somatória das duas energias era igual à energia do fóton incidente. Os autores também reportaram que este tipo de arranjo experimental produzia valores absolutos confiáveis e precisos para secções de choque duplamente diferenciais. Para os cálculos simulados de secções de choque Compton, o método da aproximação por impulso (IA) utilizado com as funções de onda por semelhança de hidrogênio (*Hydrogen-Like* - HL) e de Hatree-Fock (HF) mostraram uma excelente conformidade com os dados experimentais, obtidos na faixa de energia de 60 a 105 keV.

Em 2007, Donativi e coautores realizaram uma análise de elementos e compostos químicos com baixo número atômico Z (5 a 12), utilizando radiação espalhada e monocromática, porém com a abordagem da informação da razão Rayleigh/Compton (R/C)²⁹. A justificativa dos autores do uso da razão R/C, ao invés da análise separada dos dois modos de espalhamento, era que a razão R/C não possuía dependência do arranjo geométrico e nem com a densidade física do

material, mas possuía com altas potências de Z e podia caracterizar e identificar materiais com valores baixos de Z. Através do uso de um tubo de raios X e de um detector posicionado em ângulo de espalhamento Compton igual a 90° , os resultados mostraram uma boa concordância entre valores práticos e teóricos, tornando a técnica uma boa alternativa de medida para materiais de valores baixos de Z e coeficientes de atenuação linear de valores próximos.

Naquele mesmo ano, Seo e colaboradores utilizaram, através do método de Monte Carlo, imagens formadas por uma câmera Compton de duplo espalhamento (DOCI – *Double-Scattering Compton Imager*) juntamente com o software de simulação GEANT4³⁰. O modelo da simulação incluía detalhes geométricos do detector, resolução de energia, resolução espacial e níveis de discriminação de energia da fonte e do detector. O objetivo da pesquisa era melhorar a eficiência e resolução da câmera Compton utilizando dois detectores na função de espalhadores, ao invés de um, e um detector na função absorvedor. A função do espalhador era determinar a localização do espalhamento Compton e a energia depositada neste, enquanto a função do absorvedor determinava a localização e a energia do fóton absorvido neste. Os autores reportaram que os resultados demonstraram um significativo aumento na resolução da câmera Compton com a utilização de dois espalhadores. Porém a eficiência obtida ainda era baixa, aproximadamente 10%, quando comparada com o sistema de um espalhador. Eles ressaltaram que tal eficiência poderia ser melhorada colocando múltiplos detectores de alta resolução para cada detector espalhador.

Em 2008, Seo e colaboradores utilizaram novamente a configuração geométrica com a câmera Compton de duplo espalhamento, porém com uma nova configuração, na tentativa de maximizar a eficiência³¹. Após simulação realizada com o software GEANT4, os autores posicionaram dois detectores de espalhamento em paralelo, com 8 cm de separação e para uma energia gama de aproximadamente 500 keV. Os resultados apresentaram uma resolução de imagem de 8,6 mm (FWHM - *Full Width at Half Maximum*) e sensibilidade de $1,3 \times 10^{-7}$ respectivamente. Além disso, os autores ressaltaram que com a maximização da eficiência obtida nesta configuração geométrica e nesta dada energia gama, além da portabilidade, a câmera Compton poderia ser utilizada para aplicações de imagens tomográficas do tipo PET (*Positron Emission Tomography*) aplicadas à análise do corpo humano.

Em 2009, Yao e Leszczynski apresentaram uma abordagem analítica para, aproximadamente, separar as informações desconhecidas da fórmula da secção de choque de Klein-Nishina e expressá-las através da intensidade primária dos raios X no detector³². Os autores reportaram que a distribuição espacial do espalhador de primeira ordem Compton podia ser descrita pela fórmula da secção de choque Klein-Nishina assumindo que fosse conhecido o espectro de energia da fonte, a geometria do sistema de imagem e a informação volumétrica do meio de espalhamento, incluindo as propriedades da geometria e da distribuição da radiação. Tais informações ficavam misturadas e geralmente não podiam ser completamente separadas. Os autores consideraram uma fórmula aproximada na qual as características do espalhador fossem separadas das informações da fonte de raios X e do sistema de imageamento. A aproximação obtida foi comparada com a solução exata da secção de choque de Klein-Nishina e com as simulações realizadas através do método de Monte Carlo. O resultado obtido mostrou que a relação aproximada entre o espalhamento de primeira ordem e a fluência da intensidade primária no detector foi útil na estimação da radiação espalhada em projeções físicas de um corpo de prova.

No mesmo ano, Hartemann publicou uma revisão sobre espalhamento Compton linear e não linear comparando com o espalhamento Thomson³³. Nessa revisão, Hartemann ressaltava que dois processos distintos possuíam importantes funções no regime não linear (i) as interações multifótons, que levavam a geração de harmônicas, e (ii) a pressão da radiação, que produziam uma mudança nas características espectrais irradiadas. Ambos os fenômenos influenciavam no brilho da fonte e exigiam dos pesquisadores diferentes estratégias de modelagem. Adicionalmente, o autor notou que as simulações realizadas com a técnica de Monte Carlo ofereciam uma poderosa alternativa de abordagem para descrever efeitos não lineares e tridimensionais, embora ainda permanecesse um importante desafio que era o mapeamento adequado da distribuição do campo eletromagnético incidente. O autor concluiu que ao se comparar os espalhamentos Compton e Thomson, a natureza juntamente com suas particularidades, ficava evidente a necessidade de se considerar a mudança de momentum para aplicações de precisão, tal como para Ressonância Nuclear de Fluorescência (NRF – *Nuclear Resonance Fluorescence*).

Em 2010, Pratt e coautores revisaram a teoria padrão sobre o espalhamento Compton de elétrons de valência e descreveram as descobertas que exigiam

modificação do entendimento usual observando das consequências para o experimento³⁴. Neste trabalho os autores demonstraram que a estimativa realizada por Eisenberg e Platzman (EP) para a validade da teoria da aproximação por impulso (IA) (aplicada ao espalhamento Compton) estava errada, embora a conclusão qualitativa permanecesse intacta. Eles ressaltaram que a IA provia uma boa descrição do espalhamento Compton na região de pico, mas falhava quando se considerava fótons resultantes de baixa energia.

No mesmo ano, Pires e colaboradores publicaram uma revisão de literatura dos últimos 25 anos do uso da tomografia computadorizada no Brasil para análise da física de solos³⁵. Dentre as técnicas tomográficas, os autores dissertaram sobre os bons resultados obtidos através da tomografia por espalhamento Compton na análise de densidade do solo.

Em 2011, Şahin e colaboradores realizaram medidas de retenção de água em solos utilizando o espalhamento Compton³⁶. O arranjo experimental utilizado continha uma fonte de raios gama (500 mCi; 356 keV) e um detector cintilador de NaI(Tl), bem como o solo utilizado foi um Holocênico ou Neossolo Flúvico (*Entisol*) de acordo com a classificação norte americana (EUA). Adicionalmente, o ângulo de espalhamento escolhido foi o de 90° e a espessura do solo foi variava de 5 a 55 mm com passo de 5 mm. O valor do coeficiente de atenuação em massa obtido foi de 0,102 cm²/g e a relação entre a quantidade de água adicionada e a intensidade da radiação espalhada apresentou um coeficiente de correlação de $r^2 = 0,99$. Os autores concluíram que o desempenho do método com espalhamento Compton baseado na curva padrão mostrou que os resultados obtidos da avaliação das incertezas analíticas foram satisfatórios.

Também em 2011, Cruvinel e Scannavino Jr. publicaram a evolução instrumental obtida no desenvolvimento de um densitômetro de campo que utiliza fonte de raios X e o processamento digital de sinais para medidas de compactação de solos agricultáveis³⁷. Os autores apresentaram a viabilidade e as características técnicas de um detector de estado sólido composto pelo fotodiodo de Si-Pin. A utilização da tecnologia digital e detector de estado sólido melhoravam parâmetros importantes para as medidas Compton, tais como (i) melhor desempenho, melhor resolução específica e operação a altas taxas de contagem; (ii) uma maior flexibilidade, opções de configuração disponíveis e selecionadas por software através de uma interface; (iii) uma maior estabilidade e reprodutibilidade de medidas.

O sinal de entrada do detector era digitalizado e proporcionava processar digitalmente o sinal em tempo real. O espectro era então obtido digitalmente. A arquitetura instrumental apresentada viabilizava a portabilização de um equipamento já validado e empregado em laboratório para uso direto em campo, tomando por base o uso de fonte de raios X, instrumentação para detecção de fótons espalhados, contagem e processamento digital de sinais para medidas densitométricas para medidas da compactação de solos agricultáveis.

Em 2012, Harkness e coautores descreveram a funcionalidade de uma aplicação da câmera Compton integrada à arquitetura para simulações orientadas à medicina e baseadas no *software* de simulação GEANT4 (GAMOS)³⁸. Os autores realizaram uma validação preliminar para demonstrar a aplicação da câmera Compton através da comparação de dados simulados pela GAMOS (para investigações com o método de Monte Carlo) com dados adquiridos experimentalmente. Para os dados experimentais, foi utilizada uma câmera Compton configurada com dois detectores de germânio com alta pureza e posicionados unilateralmente, bem como duas fontes de radiação gama, uma de 661,7 keV (^{137}Cs) e outra de 1332,5 keV (^{60}Co). A resolução das imagens calculadas em fatias e geradas através de simulações com a GAMOS comparada com a resolução obtida experimentalmente mostraram uma excelente concordância.

Naquele mesmo ano, Scannavino Jr. e Cruvinel desenvolveram uma ferramenta gráfica para otimizar os parâmetros geométricos de um arranjo experimental aplicado ao espalhamento Compton³⁹. A ferramenta analisava as contribuições de parâmetros como a energia dos fótons incidentes, o fluxo dos fótons incidentes e o ângulo de espalhamento Compton na quantidade de fótons espalhados pelo efeito Compton. Adicionalmente, a ferramenta amostrava os resultados através de 4 tipos de saídas gráficas: (i) gráfico polares para a variação do ângulo de espalhamento (Figura 4), (ii) gráficos semi-logarítmicos para a variação da energia dos fótons incidentes, (iii) gráficos lineares para a variação do fluxo dos fótons incidentes e (iv) tabelas de parâmetros estatísticos (variância, desvio padrão e coeficiente de variação) dos resultados obtidos pelas variações das grandezas citadas anteriormente.

Figura 4 - Exemplo de gráfico polar gerado pela ferramenta para variação do ângulo de espalhamento Compton versus o número de fótons espalhados $S(E)$ normalizado em função de elemento de volume dV e elemento de ângulo sólido $d\Omega$ ³⁹.

Na Figura 4 está ilustrada uma das opções de saídas gráficas disponível através de um gráfico polar da contribuição da variação do ângulo de espalhamento Compton no número de fótons espalhados $S(E)$ normalizado em função de elemento de volume dV e elemento de ângulo sólido $d\Omega$. As informações apresentadas pela ferramenta se mostraram útil para comparações e avaliações de medidas laboratoriais usando o espalhamento Compton em estudos de compactação de solos agrícolas. Além disso, a estratégia utilizada pelos autores permitia validar um modelo computacional para aplicação em design de instrumentação aplicada ao tema.

Neste ano de 2013, Rigaud e colaboradores modelaram e simularam a reconstrução de imagens tomográficas obtidas por fótons espalhados pelo Efeito Compton⁴⁰. Para tal, os autores desenvolveram um algoritmo rápido baseado em uma nova classe de transformadas de Radon denominadas de arcos circulares (*Circular Arcs Radon Transform – CART*) e na retroprojeção filtrada (*Filtered Back-Projection – FBP*). Os resultados da simulação com a CART-FBP foram comparados com imagens reconstruídas com um algoritmo baseado na Transformada de Radon combinada com a retroprojeção filtrada (RT-FBP). As diferenças dos erros quadrados médios normalizados e dos erros absolutos médios normalizados de ambas as técnicas (CART-FBP e RT-FBP) foram inferiores à 0,5% e 0,02%, respectivamente. Os autores ressaltaram que a modelagem proposta provou ser uma alternativa em relação às demais técnicas, pois manteve, no mínimo, a mesma qualidade de reconstrução de imagem das técnicas convencionais. Adicionalmente,

ênfatizaram que a tomografia Compton comparada à tomografia de raios X por transmissão direta possui a vantagem de ser menos sensível ao envelhecimento dos materiais, pois o meio é analisado por sua densidade eletrônica e não por seu coeficiente de atenuação.

1.3 ESTADO DA TÉCNICA

Em 1995, Norton patenteou uma metodologia para tomografia laboratorial por espalhamento Compton que empregava uma fonte monoenergética de raios gama e um detector cuja capacidade de detecção abrangia a energia dos fótons espalhados e a sua localização através de um detector disposto em um dos lados do objeto a ser imageado⁴¹. A metodologia era baseada nas medidas de energia dos fótons detectados e nas localizações dos detectores nos quais um círculo de possíveis localizações de espalhamento era determinado para cada evento de espalhamento. A densidade do objeto analisado podia ser reconstruída através de filtragem e retroprojeção de dados que geravam uma imagem susceptível a variação da densidade do material a ser analisado.

1.4 OBJETIVOS

O trabalho de doutorado, ao qual esta tese se refere, teve por objetivo modelar, desenvolver e construir um tomógrafo de efeito Compton para a análise da densidade e da compactação de solos agrícolas em ambiente de campo. Adicionalmente, a metodologia de medidas tomográficas adotada visou a preservação das características físicas do solo da região amostrada, não causando danos ao ambiente agrícola, pois não houve a necessidade de coleta de amostras. A pesquisa utilizou uma modelagem computacional para a avaliação do número de fótons espalhados pelo efeito Compton através da análise das contribuições dos parâmetros experimentais no resultado final.

A pesquisa contou com a infraestrutura e o apoio técnico-financeiro da Embrapa Instrumentação – CNPDIA, da parceria do Instituto de Física de São Carlos – IFSC/USP e do financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP através do processo # 2009/50405-1.

2 INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO IONIZANTE COM A MATÉRIA

Um feixe de raios X ou gama ao incidir sobre a matéria tem sua intensidade diminuída em função das interações que ocorrem entre o feixe e a matéria. As principais interações da radiação com a matéria são: o efeito Fotoelétrico⁴²⁻⁴³, o espalhamento Compton⁴⁴, o espalhamento Rayleigh⁴⁵, a formação de pares⁴⁶ (elétron-pósitron) e as interações nucleares⁴⁷. Tais interações possuem predominância de ocorrência conforme o nível de energia do feixe incidente. Para uma faixa de energia entre keV e MeV, as predominâncias podem ser divididas em quatro regiões. A primeira região está compreendida entre 5 keV e 30 keV, na qual o efeito Fotoelétrico possui uma contribuição superior a 80% das interações. A segunda região está situada entre 30 keV e 300 keV, na qual há uma mescla de efeito Fotoelétrico, espalhamento Compton e espalhamento Rayleigh. A terceira se situa entre 300 keV e 1 MeV, na qual o espalhamento Compton contribui aproximadamente com 100% de predominância. A quarta surge a partir do limiar de 1,022 MeV, na qual ocorre a produção de pares.

A produção de pares é gerada na interação de um fóton de alta energia com um átomo, na qual o fóton se extingue e a sua energia é transformada em par elétron-pósitron. Adicionalmente, há a ocorrência aleatória de mais dois efeitos: a atenuação e o múltiplo espalhamento¹⁰. O efeito da atenuação é caracterizado pela remoção preferencial de fótons de uma região espectral específica, enquanto o múltiplo espalhamento é caracterizado pela geração de radiação secundária devido às múltiplas interações da radiação com a matéria.

No efeito Fotoelétrico, a energia do fóton incidente é completamente absorvida por um elétron fortemente ligado nas camadas mais internas do átomo e um fóton-elétron é emitido. A energia para a emissão de um fóton-elétron é igual à diferença entre a energia do fóton incidente e a energia de ligação do elétron.

No espalhamento Rayleigh, os fótons incidentes colidem com elétrons da matéria e mudam as suas direções sem perdas de energia (evento elástico). Todavia, no espalhamento Compton, os fótons incidentes também se colidem com os elétrons da matéria, porém perdem parte de suas energias (evento inelástico) e se espalham em novas direções geradas pelas colisões.

Pelo fato do tema desta tese ser sobre um tomógrafo de espalhamento Compton e sua aplicação nos estudos sobre a física de solos, dar-se-á uma maior ênfase ao efeito Compton. Tal efeito foi descoberto em 1923 pelo físico Arthur Holly Compton. Ele fez com que um feixe de raios X incidisse sobre um alvo de grafite e analisou, através do comprimento de onda, as intensidades dos raios X espalhados em determinadas direções. Os resultados obtidos demonstraram que embora o feixe incidente tivesse um comprimento de onda único, os feixes espalhados tinham picos de intensidade em dois comprimentos de onda. Destes, um possuía um comprimento de onda igual ao do feixe incidente e o outro maior. A diferença entre os comprimentos de onda dependia de um determinado ângulo de espalhamento.

O pico de intensidade do comprimento de onda maior era completamente incompreensível se os raios X incidentes fossem analisados pelo modelo ondulatório, pois nesse modelo uma onda com frequência f provocaria oscilação nos elétrons do alvo e estes seriam irradiados na frequência de oscilação que seria a mesma da onda que a gerou (f). Por isso, Compton imaginou que o feixe incidente fosse igual a uma corrente de fótons (com energia E_0 e momento p_0) e admitiu que alguns desses fótons colidiam como bolas de bilhar com os elétrons livres do alvo. Estes elétrons, recebendo parte da energia cinética da colisão, faziam com que o fóton espalhado tivesse uma energia E menor e de comprimento de onda maior que a do fóton incidente E_0 (Figura 5). Devido ao ganho em energia, o elétron era ejetado do átomo e perdia esta energia ionizando novos átomos da matéria. Todavia, devido à diferença de massa que existia entre ambos, o elétron não era capaz de absorver totalmente a energia do fóton.

A distribuição da energia de espalhamento Compton está centrada na energia mais provável de espalhamento E [keV], na energia incidente E_0 [keV] e no ângulo de espalhamento θ (equação 1). O deslocamento do comprimento de onda dos fótons espalhados $\Delta\lambda$ pode ser expresso em função da grandeza denominada de comprimento de onda Compton ($h/(m_e c)$) e tem o valor igual a 2,43 pm. O deslocamento Compton, que depende exclusivamente do ângulo de espalhamento ξ , varia desde zero (colisão tangencial), no qual não há desvio, até $((2 \cdot h)/(m_e c))$ que representa uma colisão frontal (colisão à 180°) em que ocorre a inversão no sentido de propagação do fóton⁴⁸. A relação entre as energias incidente e de espalhamento e o ângulo de espalhamento θ é dada pela equação:

$$\left(\frac{E}{E_0} \right) = \frac{1}{1 + a(1 - \cos \theta)} \quad (1)$$

onde a é a razão entre a energia E_0 e a energia de repouso ($\cong 511$ keV) de um elétron.

Figura 5 - Representação Esquemática do Efeito Compton. O fóton incidente de energia E_0 ao se chocar com o elétron desloca-o, perde parte de sua energia e muda a sua trajetória.

Além da relação existente entre a energia de espalhamento e o ângulo de espalhamento pelo efeito Compton, tal efeito também possui relação com a composição química do material no qual ocorre o espalhamento. Um dos parâmetros físicos que estão presentes no efeito Compton e que interfere nessa relação com o material é o coeficiente de atenuação linear.

O coeficiente de atenuação linear μ [cm^{-1}] corresponde a uma redução fracional da intensidade do feixe incidente por unidade de distância e possui dependência com a densidade do material absorvedor (ρ), com o número atômico do elemento químico (Z) e com a energia dos fótons incidentes (E_0)⁹. A relação entre a intensidade dos fótons transmitidos (I) e a intensidade do feixe sem a presença do material absorvedor (I_0) é dada pela lei de Beer-Lambert:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d} \quad (2)$$

onde d [cm] é a espessura do material da amostra.

Para valores de energia do feixe incidente superiores à 10 keV, quando a energia de ligação molecular é pequena, assume-se que μ é diretamente

proporcional à densidade física (ρ) e, desta forma, a equação (2) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$I = I_0 \cdot e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho \cdot d} \quad (3)$$

onde (μ/ρ) é o coeficiente de atenuação de massa [cm^2/g]. A relação (μ/ρ) está relacionada com a probabilidade (ou secção de choque) da radiação interagir com a matéria de alguma forma.

O coeficiente de atenuação linear pode ser obtido pela seguinte equação⁴⁹:

$$\mu = \frac{\rho \cdot \sigma_e^t(E) \cdot Z \cdot N_A}{A} \quad (4)$$

onde μ [cm^{-1}] é o coeficiente de atenuação linear para um material de densidade física igual a ρ [g/cm^3], número atômico Z e massa atômica A , bem como $\sigma_e^t(E)$ [$\text{cm}^2/\text{elétron}$] é a secção de choque por elétron e N_A é o número Avogadro.

Além do coeficiente de atenuação linear, o outro parâmetro físico que está presente no efeito Compton e que interfere na relação entre espalhamento e o material é a densidade eletrônica. A densidade eletrônica δ_e representa o número de elétrons por centímetro cúbico e é dada por:

$$\delta_e = \rho \frac{Z \cdot N_A}{A} \quad (5)$$

Esta expressão demonstra a proporcionalidade existente entre o espalhamento Compton e a densidade física do material sob análise.

A probabilidade de um fóton colidir (interagir) com um elétron livre, gerando um fóton espalhado por efeito Compton pode ser mensurada pela equação da secção de choque diferencial de Klein-Nishina. Tal secção de choque diferencial é dada unicamente pela relação entre a energia dos fótons Compton e o ângulo de espalhamento:

$$\frac{d_e \sigma^{KN}(E)}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left[\frac{1 + \cos^2 \theta}{(1 + a(1 - \cos \theta))^2} \left[1 + \frac{a^2 (1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)(1 + a(1 - \cos \theta))} \right] \right] \quad (6)$$

onde $r_0 (\cong 2,818 \times 10^{-13} \text{ cm})$ é o raio clássico do elétron⁵⁰.

O feixe de fótons incidentes sofre atenuação nos caminhos entre fonte-amostra e amostra-detector. A contagem dos fótons atenuados por espalhamento Compton é dada por:

$$S(E) = \Phi_0 \exp \left(- \int_{x_1} \mu_1(x) dx - \int_{x_2} \mu_2(x) dx \right) \frac{d_e \sigma^{KN}}{d\Omega} \delta_e dV d\Omega \quad (7)$$

onde μ_1 e μ_2 são os coeficientes de atenuação linear dos percursos fonte-amostra e amostra-detector, dV é o diferencial de volume de interseção dos campos de visão da fonte e detector, $d\Omega$ é o diferencial de ângulo sólido associado à secção de choque diferencial de Klein-Nishina e x_1 e x_2 representam o comprimento linear dos percursos entre fonte e amostra e entre amostra e detector, respectivamente.

A equação (7) pode ser reescrita de uma maneira mais realística incluindo dois novos termos experimentais que contribuem para a quantidade final de fótons detectados¹⁹. Tais termos são a janela de tempo t da amostragem e a eficiência do detector ε na região do fotopico. Portanto, a contagem do número de fótons espalhados pode ser dada por:

$$S(E) = \Phi_0 \cdot \varepsilon \cdot t \cdot \exp \left(- \int_{x_1} \mu_1(x) dx - \int_{x_2} \mu_2(x) dx \right) \cdot \frac{d_e \sigma^{KN}}{d\Omega} \cdot \delta_e \cdot dV \cdot d\Omega \quad (8)$$

A equação (8) possibilita avaliar a provável quantidade de fótons espalhados pelo efeito Compton através dos parâmetros experimentais físicos, geométricos e químicos.

3 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO DO TOMÓGRAFO COMPTON DE CAMPO

O desenvolvimento metodológico do tomógrafo Compton de campo levou em consideração parâmetros experimentais essenciais para a realização de medidas tomográficas por espalhamento Compton, tais como parâmetros geométricos para a detecção de fótons espalhados por Efeito Compton, dimensões da área amostrada do solo e requisitos da reconstrução de imagens pela técnica tomográfica.

Através de uma modelagem computacional do número de fótons espalhados pelo Efeito Compton, foi possível escolher os melhores ajustes dos parâmetros experimentais que interferem na melhor figura de mérito e eficiência do uso do efeito Compton, tais como a geometria e a energia do feixe de raios X.

A descrição sobre a modelagem, o projeto, o desenvolvimento e a construção do tomógrafo Compton de campo está organizada da seguinte maneira: (3.1) Simulação Computacional do Número de Fótons Espalhados pelo Efeito Compton, (3.2) Ótica de Raios X e Arquitetura Mecânica, (3.3) Sistema Eletrônico e de Medida, (3.4) Automação e Aquisição de Dados e (3.5) Algoritmo de Correção da Matriz de Projeções e Reconstrução de Imagens.

3.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO NÚMERO DE FÓTONS ESPALHADOS PELO EFEITO COMPTON

A tomografia por efeito Compton possui fatores que necessitam ser avaliados para que as análises quantitativas estejam dentro de uma margem de erro aceitável. Dentre tais incertezas, têm-se o número de fótons medidos, as contribuições de efeitos secundários do espalhamento de fótons e o volume de espalhamento de onde se deriva o sinal a ser utilizado para a avaliação da medida. Assim, é importante que através de uma simulação computacional sejam avaliadas as contribuições dos fenômenos físicos inerentes à tomografia Compton e seus respectivos pesos no resultado final.

A modelagem organizada para a simulação computacional do espalhamento de fótons por efeito Compton foi baseada na equação (8). Em tal equação pode-se

analisar as contribuições da geometria experimental, da composição química do material a ser analisado e das características do feixe de raios X incidentes, tais como fluxo e energia dos fótons (Figura 6).

Figura 6 - Diagrama de blocos do modelo para abordagem analítica na caracterização visual do efeito Compton.

No que tange a geometria experimental, há uma dependência da energia espalhada E com o ângulo de espalhamento Compton θ , tornando-se importante a análise da contribuição dos parâmetros geométricos da medida (Figura 7).

Nota-se que os campos de visão da fonte e do detector possuem o formato de um cone (fonte – retas s e t ; detector – retas r e n). A intersecção de ambos os cones têm seus limites dados pelos pontos Z_1 , Z_2 , Z_3 e Z_4 , formando um volume denominado de volume de intersecção dos cones dos campos de visão. Os fótons detectados são gerados pelas colisões entre estes e os elétrons dos átomos que compõem a amostra dentro do volume de intersecção.

Figura 7 - Arranjo geométrico para experimentação com espalhamento Compton em ambiente de campo.

O posicionamento do detector, através da escolha do ângulo de espalhamento θ , determina a secção de choque de Klein-Nishina e a energia dos fótons espalhados. Os diâmetros dos colimadores da fonte e detector juntamente com seus comprimentos determinam os meio-ângulos de abertura α e β que, consequentemente, influenciam no volume de interseção dos campos de visão.

A contribuição do coeficiente de atenuação linear para as energias de incidência e de espalhamento na equação (8) foi denominada, neste modelo (Figura 9), de componente do fator de atenuação linear ($cfat(\mu, x)$) e a secção de choque diferencial de Klein-Nishina (equação 6) de KN. Assim, o fator do coeficiente de atenuação linear ($cfat(\mu, x)$) é dada pela equação:

$$cfat(\mu, x) = \exp \left(- \int_{x_1}^x \mu_1(x) dx - \int_x^{x_2} \mu_2(x) dx \right) \quad (9)$$

Normalizando a equação (8) em função do elemento do volume de interseção dV e do ângulo sólido diferencial $d\Omega$, a mesma pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{S(E)}{dV \cdot d\Omega} = \Phi_0 \cdot t \cdot \varepsilon \cdot cfat(\mu, x) \cdot KN \cdot \delta_e \quad (10)$$

onde o valor resultante é dado em fótons por esferoradianos (sr) por centímetros cúbicos (cm³).

Uma vez escolhido o elemento ou composto químico a ser analisado determina-se o número atômico Z (elemento) ou o número atômico efetivo Z_{ef} (composto), a densidade física do material (ρ) e a massa atômica A (elemento) ou massa molar A_m (composto) através dos valores tabelados pela literatura. A densidade eletrônica (δ_e) é calculado pelos valores de Z ou Z_{ef} , A ou A_m , ρ e do valor da constante de Avogadro ($6,02 \times 10^{+23}$ atom/mol).

As escolhas dos valores da energia dos fótons incidentes (E_0) e do ângulo Compton (θ) determinam o nível de energia dos fótons Compton (E), o valor da

variável α ($E_0/511[\text{keV}]$) e, conseqüentemente, o valor da secção de choque de Klein-Nishina (KN). Adicionalmente, o valor do ângulo θ determina o caminho percorrido pelo fóton espalhado (x'_2) dentro do porta-amostra. A variável KN ainda se utiliza dos valores do raio clássico do elétron ($2,82 \times 10^{-13}$ cm) e da energia do elétron em repouso (511 keV). O fator do coeficiente linear $cfat$ se utiliza dos valores do caminho percorrido pelo fóton incidente (x'_1) e do fóton espalhado (x'_2) além dos valores dos coeficientes de atenuação linear para a energia incidente (μ_1) e para a energia de espalhamento (μ_2). A equação normalizada dos fótons detectados (equação 10) utiliza os valores do tempo de amostragem (t), da eficiência do detector no fotopico (ε) e dos valores calculados das variáveis δ_e , KN , $cfat$.

As saídas gráficas produzidas pela ferramenta podem ilustrar a variação do espalhamento de fótons por efeito Compton através de parâmetros de entrada como a energia e o fluxo dos fótons incidentes e a variação angular Compton que determina a energia dos fótons espalhados que atingem o detector. Exemplos de resultados produzidos no ambiente de simulação são apresentados por meio de parâmetros estatísticos tal como a variância (σ^2), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV).

3.2 ÓTICA DE RAIOS X E ARQUITETURA MECÂNICA

A arquitetura mecânica e ótica do tomógrafo de espalhamento Compton em ambiente de campo tem como uma de suas contribuições a sua inovadora metodologia de análise. Tal metodologia permite avaliar a densidade e a compactação de solos agrícolas *in situ* sem degradação ambiental ou coleta de amostras. A coleta de amostras de solo geralmente é realizada através de um método denominado de Anel Volumétrico⁵¹. Todavia na coleta de amostras pode haver a ocorrência de enrugamentos na periferia da amostra e/ou de trincas e tais problemas podem mascarar as características originais dos locais amostrados.

Na metodologia adotada para a tomografia Compton de campo, a região do solo que será amostrada terá uma extensão máxima de 10 cm, pois segundo sugestões publicadas na literatura da área, para uma adequada análise de uma

amostra de solo, esta deve ter preferencialmente 10 cm de diâmetro^{*52}. A profundidade máxima será de 2 cm, na qual para a escolha deste valor ponderou-se as medidas realizadas em laboratório com a máxima energia da fonte de raios X e o arranjo geométrico da ótica de raios X (Figura 7). A rotação adotada terá uma variação angular máxima de 20° à 60°, considerando as limitações impostas pela geometria da sonda (Figura 8).

Figura 8 - Diagrama esquemático da metodologia de análise com o uso da tomografia Compton em ambiente de campo.

A arquitetura mecânica de medida é composta por um suporte para fixação dos posicionadores, fusos de deslocamento, sonda (fonte e detector de raios X), bem como por um suporte para uma maleta de acondicionamento da eletrônica de controle e do *laptop* (Figura 9).

O suporte do sistema de controle, a maleta do sistema eletrônico e o sistema do posicionamento automático estão apresentados na Figura 10. Todo o módulo eletrônico do sistema de posicionamento (DAQ, UCS e UPC) se encontra no interior da maleta, abaixo do painel frontal. O painel frontal da maleta possui suportes para o equipamento de GPS que fornece as coordenadas geográficas do local a ser amostrado e para o *laptop*.

* GROSSMAN, R. B., REINSCH, T. G. The solid phase: bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H., TOPP, G. C. (Eds.), **Methods of soil analysis**. part 4. physical methods. Madison: Soil Science Society of American Book Series, 2002. p. 201–238.

A mesa posicionadora (Figuras 11 e 12) é responsável pelos deslocamentos espaciais da sonda. Sua sustentação é feita por guias e fusos de deslocamento localizados em um suporte sobre a estrutura de apoio.

Figura 9 - Diagrama de blocos do sistema mecânico do tomógrafo Compton em ambiente de campo.

Figura 10 - Disposição do gerador de alta tensão da fonte de raios X, laptop e GPS em uma maleta metálica de 76 cm x 54 cm x 23,5 cm e altura dos pés metálicos de 76 cm. As placas de circuito impresso se encontram abaixo do painel frontal da maleta.

Figura 11 - Vista superior da mesa de posicionamento

A mesa posicionadora possui dois ajustes de posição: (i) ajuste manual (deslocamentos x e z (altura)) e (ii) ajuste automático que abrange todos os deslocamentos. A mesa foi confeccionada em alumínio e sua estrutura composta de uma armação retangular vazada, de dimensões 1,13 m por 0,52 m, e por dois perfilados em forma de U, de dimensões 1,02 m x 0,13 m x 0,06 m por 0,11 de comprimento. A união destes dois perfilados foi feita através duas chapas de dimensões 0,52 m x 0,12 m x 0,02 m. A sustentação foi feita por três pés ajustáveis, sendo que dois estão localizados em cada extremidade da armação e um centralizado no lado oposto aos dois, possibilitando desta forma um melhor nivelamento de toda a estrutura.

No interior da estrutura de suporte se encontra uma base montada de forma transversal, também em alumínio, de dimensões 0,50 m x 0,15 m x 0,08 m. Tal base é sustentada por dois eixos retificados de diâmetro igual a 0,02 m.

Para a movimentação da sonda, a mesa possui o sistema mecânico montado sobre eixos retificados e dois rolamentos lineares de esfera de 0,02 m de diâmetro. No centro das chapas de união das barras do suporte da estrutura mecânica da

mesa posicionadora se encontra um fuso de esfera laminado de diâmetro igual a $0,018\text{ m}$ e passo de $8 \times 10^{-3}\text{ m}$, no qual a movimentação da sonda é feita por este fuso através de uma porca de esfera de $8 \times 10^{-3}\text{ m}$. Para o ajuste automático do posicionamento, a mesa conta com um motor de passo localizado em uma das extremidades desse fuso e é dedicado ao movimento correlacionado ao eixo x com um incremento/decremento de $40\text{ }\mu\text{m}$ por passo do motor (Figura 11). Para o ajuste manual do posicionamento no eixo x, do lado oposto ao motor de passo, foi colocado um volante para, se for o caso, o posicionamento manual (Figura 12).

Figura 12 - Vista lateral da mesa de posicionamento

Na parte inferior da mesa posicionadora foi montado todo o sistema para o deslocamento y. A movimentação na direção y é feita sobre um fuso de esfera laminado de passo $5 \times 10^{-3}\text{ m}$ e diâmetro igual a $14 \times 10^{-3}\text{ m}$, cobrindo toda a extensão inferior da mesa. Tal movimentação é realizada através de uma porca de esfera de

passo 5×10^{-3} m, fixada em outra base. A sustentação do sistema de deslocamento do eixo y foi feita sobre uma guia linear fixada na parte inferior da mesa posicionadora, juntamente com o correspondente suporte móvel para essa guia.

Os desenhos mecânicos da mesa posicionadora se encontram no Apêndice.

3.3 SISTEMA ELETRÔNICO E DE MEDIDA

O sistema eletrônico e de medida utilizado no tomógrafo Compton de campo é composto por: (i) fonte de alimentação de alta tensão e fonte de raios X, (ii) sistema de detecção e (iii) módulos eletrônicos de comunicação, controle e automação.

3.3.1 A FONTE DE RAIOS X

A fonte de raios X é do tipo ampola e possui uma fonte de alimentação de alta tensão regulável na faixa de tensão elétrica de 0 a 50 kV e corrente elétrica fornecida na faixa de 0,10 mA a 1,45 mA. Adicionalmente possui filtro de alumínio de 0,50 mm e foi produzida pelo fabricante EIS – *Scientific Instruments*® (Figura 13).

Figura 13 - Desenho esquemático e foto do gerador de raios X e detalhes da ampola

O cátodo possui polaridade negativa e filamento de tungstênio (W) por ser um material flexível e resistente ao *stress* causado pelo aquecimento. Adicionalmente, o filamento de tungstênio é disposto na forma de bobina que é colocada em um tipo de copo metálico com o foco raso. Quando aquecido, os elétrons se tornam agitados e são liberados da superfície do tungstênio. Pelo fato do ânodo possuir polaridade positiva, o fluxo de elétrons liberado pelo cátodo é atraído e acelerado em direção ao

ânodo. Tal fluxo atinge o ânodo, fazendo com que este emita radiação, sendo 1% em forma de raios X e 99% em forma de radiação térmica. Aproximadamente a metade dos raios X é absorvida pelo alvo (ânodo) e o restante emerge do tubo através de uma abertura denominada de janela de alumínio. Durante o bombardeamento de elétrons, o alvo não deve esquentar muito e por esta razão possui óleo para auxiliar no resfriamento, além de proteções metálicas e de chumbo a fim de isolar o tubo de vidro.

Caso ocorra um aquecimento excessivo no alvo, o mesmo emitirá elétrons e estes seguirão do ânodo para o cátodo em um ciclo inverso e o filamento, poderá ser danificado pelo bombardeamento desses elétrons. Visando a prevenção desse evento, geralmente os tubos possuem retificadores de silício que são colocados no circuito para atuarem como uma chave que bloqueia a corrente de elétrons no sentido inverso.

3.3.2 O SISTEMA DE DETECÇÃO DE RAIOS X

O tomógrafo Compton para uso no campo conta com um sistema de detecção denominado sistema X-123SDD da AMPTEK[®]. Tal sistema é composto por: (i) um detector de estado sólido composto por um fotodiodo de silício (SDD – *Silicon Drift Detector*), modelo XR-100SDD, com pré-amplificador, (ii) um processador de pulso digital (DP5) juntamente com um analisador multicanal (MCA) e (iii) uma fonte de energia elétrica (PC5) (Figura 14).

Figura 14 - Diagrama em blocos do sistema de detecção X-123SDD da Amptek[®]

O detector modelo XR-100SDD possui uma janela de Berílio (Be) de 12,5 μm de espessura. Ele é montado em um *cooler* Peltier (termoelétrico) juntamente com transistor de efeito de campo (FET – *Field Effect Transistor*) de entrada que está acoplado a um pré-amplificador de carga (Figura 15). O transistor FET coleta a corrente elétrica produzida pelo SDD e disponibiliza na entrada do pré-amplificador.

Figura 15 - Ilustração da tecnologia utilizada no Detector XR-100SDD da Amptek[®] (tradução da figura original em inglês)

Os raios X que interagem no silício criam uma média de um par elétron/lacuna para cada 3,6 eV de energia perdida no silício, que é o sinal de entrada. Cada interação no detector produz um pulso de corrente elétrica que é inserido na entrada do pré-amplificador. O pré-amplificador disponibiliza em sua saída um pulso de tensão elétrica (V) com magnitude ΔV proporcional à carga depositada (eV). No detector XR-100SDD, o ganho de conversão é de 1 mV por keV, o que gera pulsos da ordem de poucos milivolts. O circuito de realimentação para sinais de baixa frequência tem a função de pré-filtrar o sinal da saída do pré-amplificador.

A resolução em energia é um dos mais importantes parâmetros de desempenho porque através dela é possível identificar separadamente dois fótons de energias próximas. Pelo fato de cada interação produzir um pulso elétrico, se uma segunda interação ocorrer depois de um breve período de tempo, os dois pulsos podem se sobrepor no tempo. Este empilhamento de pulsos (*pulse pile-up*) pode gerar a contagem de um pulso distorcido. Além da resolução em energia, a discriminação entre os pulsos depende de um parâmetro do processador de sinais denominado de tempo de pico (*peaking time*). Para tempos de pico curtos, o ruído

aumenta rapidamente com a capacitância existente entre os eletrodos do fotodiodo. Nos fotodiodos SDD, esta capacitância é muito pequena e quase independente da área, ficando o ruído fracamente dependente da temperatura. Além da temperatura, o ruído pode aumentar para tempos de pico muito longos. O detector SDD possui uma resolução em energia de 130 eV (FWHM) em 9,6 μ s de tempo de pico* (Figura 16)⁵³.

Figura 16 - Resolução do detector de estado sólido (SDD) versus a energia para diferentes tempos de pico⁵³.

O tempo morto (*dead time*), que é o período no qual não há contagem de fótons, possui relação com o tempo de pico e, para operações com alta taxa de contagens, um tempo de pico curto é desejável. Pelo fato do ruído tender ao aumento com tempos de picos curtos, é importante se ter conhecimento das curvas de desempenho para cada tempo de pico e a máxima taxa de contagem suportada pelo detector. Para um tempo de pico de 0,2 μ s e energia de 5,9 keV, o detector SDD atinge a máxima contagem de aproximadamente $1,25 \times 10^6$ fótons por segundo (Figura 17).

A sensibilidade do detector SDD tem uma relação com a energia dos fótons incidentes e, para uma faixa de energia de 1 a 25 keV, tal sensibilidade é aproximadamente 25%. Para o tomógrafo Compton, cuja energia Compton foi de 35 keV, a eficiência de detecção foi de aproximadamente 18,75% (dado obtido do gráfico da Figura 18). Para baixas energias, a eficiência é limitada pela janela de

* Dados fornecidos pela fabricante Amptek[®] para uma energia de fótons de 5,9 keV.

Berílio (Be), pois os raios X podem parar na janela. Para altas energias, a eficiência está limitada pela probabilidade de interação do Silício, pois vários fótons podem atravessar a janela sem ocorrer interação.

Figura 17 - Resolução versus taxa de contagem com o detector de estado sólido (SDD) em função do tempo de pico, medido em 5,9 keV⁵³.

Figura 18 - Eficiência versus a energia dos fótons incidentes para o detector de estado sólido SDD⁵³ (1 mil = 0,0254 mm).

As principais vantagens apresentadas pelo uso do detector SDD envolvem: (i) o baixo ruído eletrônico, (ii) baixa capacitância de anodo (0,035 pF em 25 mm² de área de detecção), (iii) excelente resolução em energia mesmo para grandes áreas de detecção (126 eV – 25 mm²) e (iv) devido à baixa capacitância, um curto tempo

de pico (0,2 μ s a 11,2 μ s) é usado no amplificador de forma sem prejudicar a resolução, o que gera alta taxa de contagens.

No sistema de detecção X-123SDD da Amptek[®], o processador de pulso digital (DP5) digitaliza o sinal disponibilizado pelo pré-amplificador (Figura 19), aplica um processamento digital em tempo real ao sinal, detecta a amplitude do pico (digitalmente) e reúne os valores obtidos em uma memória lógica por histograma, gerando desta forma o espectro do sinal em energia. A seleção de pulso lógico pode rejeitar os pulsos de um determinado espectro através da determinação de uma região de interesse (ROI), na qual é determinada pelo usuário.

Figura 19 - Ilustração das etapas de operação do detector SDD da Amptek[®].

O estágio de pré-filtragem analógica aplica um ganho, filtra e formata o sinal de forma a otimizar a digitalização. O conversor analógico-digital (ADC) de 12 bits digitaliza o sinal gerado na pré-filtragem em uma taxa de 20 ou 80 MSPS e disponibiliza-o na entrada do modelador de pulso digital. Neste estágio existem dois caminhos paralelos de processamento de sinais: o canal “rápido” e o canal “lento”. O canal lento, que tem uma constante de tempo maior, obtém a altura dos pulsos de forma precisa. O canal rápido obtém a informação sobre o tempo: detectando os pulsos que estão sobrepostos no canal lento, medindo a taxa de contagem, medindo o tempo de subida dos pulsos, entre outras funções. Adicionalmente, a informação gerada pelo canal rápido é utilizada na seleção dos pulsos que rejeita os pulsos que prejudicam a realização precisa da medida.

O contador lógico por histograma de detecção de pico opera como um tradicional multicanal. Quando um pulso ocorre com um particular valor de pico, o

contador em um determinado local da memória é incrementado. O resultado é um histograma com o número de eventos com seus respectivos valores de pico.

O DP5 ainda possui uma interface para o usuário acessar e controlar suas várias funções através de um computador por três tipos de portas: USB, RS232 e Ethernet. Adicionalmente, possui 2 saídas auxiliares que podem ser comandadas por vários sinais: (i) uma pode ser amostrada através de um osciloscópio (a saída de um conversor DA mostra o processamento do sinal por meio de um Arranjo de Portas Programáveis em Campo – FPGA (*Field Programmable Gate Array*)) que permite o usuário realizar ajustes e depuração e outra (ii) que é um conjunto de saídas para analisadores monocanais que fornecem as contagens dos fótons diretamente por estas saídas.

A alimentação elétrica do sistema de detecção X-123SDD é fornecida por uma placa eletrônica denominada de PC5. A PC5 tem a função de converter os valores em tensão alternada para uma tensão de entrada de 5 V em tensão contínua. Adicionalmente, possui um fusível para proteção de sobrecorrente e proteção de polaridade reversa. A PC5 fornece valores de baixa tensão (+/- 5,5 V; +3,3 V; +2,5 V e +1,2 V) para os circuitos analógicos do detector e do pré-amplificador e valores de alta tensão para o detector e para o cooler termoeletrônico.

De uma maneira geral, conclui-se que o uso do sistema de detecção melhora parâmetros essenciais para as medidas tomográficas Compton, tais como: (i) melhor desempenho, melhor resolução específica e operação a altas taxas de contagem; (ii) uma maior flexibilidade, opções de configuração disponíveis e selecionadas por software através de uma interface; (iii) uma maior estabilidade e reprodutibilidade de medidas. Adicionalmente, o sistema possui um baixo consumo de energia elétrica ($\cong 2,5$ W) e dimensões reduzidas (7,0 x 10,0 x 2,5 cm), características estas que muito contribuiu para a portabilidade do equipamento para o seu uso em campo.

3.3.3 MÓDULOS ELETRÔNICOS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Os módulos eletrônicos de controle e automação do tomógrafo Compton para o uso em ambiente de campo envolveu o desenvolvimento: (i) dos módulos eletrônicos de comunicação e geração de sinais (UCS) e de circuitos de potência e

conversão de sinais para os motores de passo (UCP), (ii) de um sistema de posicionamento composto por motores de passo, fusos e acopladores mecânicos (SPM), (iii) de uma sonda composta de um sistema de detecção e fonte de raios X (SDD) e (iv) das fontes de alimentação dos módulos eletrônicos, cuja potência elétrica necessária é fornecida por uma bateria estacionária de 12V e 45 Ah (Figura 20). Adicionalmente, foram utilizados: (i) um gerador de alta tensão para a fonte de raios X (GAT), (ii) sensores de início e final de curso (SIF), (iii) um módulo de aquisição de dados (DAQ) e (iv) um computador portátil (LAP), responsável pela interface do sistema de automação e controle com o usuário, bem como para a reconstrução das imagens tomográficas (Figura 21).

Figura 20 - Diagrama em blocos da alimentação dos módulos eletrônicos e do fluxo de dados do tomógrafo Compton para uso ambiente de campo.

A motivação para a utilização da DAQ se deu por alguns fatores tais como o controle centralizado e a interface com o usuário pelo *laptop*. Nesta configuração, a DAQ é conectada ao *laptop* (LAP) para viabilizar a comunicação necessária entre o *software* de controle e os módulos eletrônicos (UCS e UCP). Com a utilização da DAQ houve uma centralização do controle e automatização do tomógrafo no *laptop*.

Figura 21 - Diagrama em blocos do módulo eletrônico do tomógrafo Compton para uso ambiente de campo.

3.3.3.1 UNIDADE DE COMUNICAÇÃO E SINAIS - UCS

Para viabilizar a comunicação da DAQ com as unidades UPC, GAT e SIF, confeccionou-se a unidade eletrônica UCS. A unidade UCS monitora o nível de tensão da bateria, aciona o GAT, recebe os sinais gerados pelo SIF e fornece o sinal de *clock*** para a UPC.

O sinal de *clock* gerado pela unidade UCS utiliza um circuito integrado (CI) denominado de PLL (*Phase-Locked Loop*), cujo modelo é o HEF4046BP e fabricado com a tecnologia CMOS. O PLL funciona como um oscilador controlado por tensão no qual o sinal gerado possui uma frequência (f_v) dependente da tensão de controle (V_c) (Figura 22).

** Sinal de *clock* é usado para coordenar as ações de dois ou mais circuitos eletrônicos e sua oscilação entre os estados alto e baixo faz com que tenha o formato de uma onda quadrada.

Figura 22 - Curva de correlação entre a tensão de controle (V_c) e frequência (f_v) do PLL 74HC4046, obtida experimentalmente.

A relação de ambos, para o nível de tensão de entrada de 5 V, foi obtida experimentalmente e pode ser expressa pela seguinte equação:

$$V_c = ((0,0019 \cdot f_v) + 1,4684) \pm 0,0515 \quad (11)$$

O nível de tensão que está sendo aplicado para a geração do sinal de *clock* é de aproximadamente 2 V com frequência igual a 300 Hz. Após a geração do sinal de *clock* pelo PLL, o mesmo é enviado para o circuito integrado HCF4052BE. Este CI é um multiplexador ou um demultiplexador, dependendo da configuração, possui a função de enviar o sinal das 2 portas de entrada X e Y para uma de suas quatro saídas (0,1,2 e 3). Cada porta de entrada possui 4 opções de saída - X0, X1, X2 e X3 para a entrada X e Y0, Y1, Y2 e Y3 para a entrada Y. A razão de se utilizar um demultiplexador é pelo fato da DAQ não possuir internamente um gerador de pulsos e possuir somente duas saídas analógicas. Portanto, com a utilização do HCF4052BE foi possível utilizar uma saída analógica e gerar o sinal de *clock* para todos os motores. A seleção do motor é realizada pelas portas A e B (Tabela 1).

Tabela 1 - Tabela verdade do demultiplexador HCF4052BE

Inibidor (INH)	B	A	Entradas/Saídas
0	0	0	X0,Y0
0	0	1	X1,Y1
0	1	0	X2,Y2
0	1	1	X3,Y3
1	-	-	-

Na UCS, a porta X do HCF4052BE está sendo utilizada como entrada, ou seja, a configuração utilizada foi de demultiplexador. O sinal de *clock* oriundo do CI HEF4046BP é conectado na porta X e, através da seleção, o sinal é distribuído para uma das saídas (X0, X1, X2 ou X3), dependendo da seleção do motor desejável. A conexão dos motores foi realizada da seguinte maneira: motor X em X0, motor Y em X1, e motor θ em X3. A porta Y, todavia, está sendo utilizada como saída, ou seja, a configuração utilizada foi a de multiplexador. Através da utilização do CI 74HC08N (Porta AND) é possível realizar a contagem do número de pulsos enviados aos motores. A escolha da porta AND se deu ao fato da contagem somente ser disponibilizada para o contador da DAQ (PFIO) quando um sinal de controle estiver em nível lógico alto. Neste caso, todos os pulsos inseridos na outra entrada do 74HC08N são enviados ao contador (Figura 23).

Figura 23 - Circuito eletrônico de contagem e geração de pulsos da UCS

A UCS também aciona o gerador de alta tensão da fonte de raios X (GAT). Essa ação é realizada através de um relé (HJR-3FF-S) e de um circuito de polarização composto por um resistor de $10k\Omega$ e um transistor bipolar BC548. Um diodo (1N4148) foi inserido entre os terminais da bobina do relé para proteção de tensão reversa. Por meio de um sinal oriundo da DAQ, a UCS aciona o temporizador do GAT (Figura 24). O valor da janela de tempo é ajustado previamente no próprio GAT, onde se encontra o temporizador.

Figura 24 - Circuito eletrônico de acionamento do GAT da UCS

Para o monitoramento do nível de tensão da bateria foi utilizado o CI TL7712 que é um supervisor de tensão de alimentação (Figura 25).

Figura 25 - Circuito eletrônico de supervisão do nível de tensão da bateria

A bateria utilizada possui uma tensão nominal de 12V, porém ao se descarregar e este valor atingir o valor de 10,8V, é gerado um sinal lógico alto. A

principal utilidade deste circuito na UCS é a de alertar sobre a baixa carga da bateria, indicando a sua recarga. O resistor de $22k\Omega$ limita a corrente de *reset*, o capacitor de $100nF$ acoplado na porta 3 (CT) tem a função de ajustar o tempo de acionamento e o outro de $100nF$ acoplado na porta 1 (REF) tem a função de reduzir a influência de transientes rápidos na fonte de tensão.

A UCS também conta com a sua própria fonte de 5V, obtida através do CI regulador de tensão LM7805, um fusível de proteção de 1A e um LED (diodo emissor de luz) indicador de funcionamento (Figura 26). Este mesmo esquema eletrônico é utilizado para a fonte de 5V da unidade UPC. Na Figura 27 é ilustrada uma foto da placa de circuito impresso da Unidade de Comunicação e Sinais (UCS).

Figura 26 - Circuito eletrônico da fonte de 5V da unidade UCS

Figura 27 - Foto da unidade eletrônica UCS

O esquema do circuito eletrônico da unidade UCS se encontra no item Apêndice deste relatório.

3.3.3.2 UNIDADE DE POTÊNCIA E CONVERSÃO DE SINAIS - UPC

A unidade UPC tem a finalidade de converter os sinais digitais para níveis necessários para alimentar os motores de passo, fornecendo assim a potência necessária para o seu funcionamento (Figuras 28 e 29). Adicionalmente, gera toda a sequência de passos necessária para cada uma das fases, configura o funcionamento em meio passo ou passo completo, seleciona o sentido de rotação (horário/anti-horário), habilita ou desabilita o funcionamento do motor e restringi o nível de corrente elétrica exigida pelos motores. Os motores de passo aplicados nos posicionadores utilizam a configuração passo completo com uma fase ligada.

O CI L297 integra todos os circuitos de controle necessários para controlar um motor de passo unipolar ou bipolar. Tal CI recebe os sinais de controle da unidade UCS e provê todos os sinais do estágio de potência. Além disso, o L297 possui dois circuitos PWM (*Pulse Width Modulation*) para regular a corrente no enrolamento do motor. Adicionalmente, a técnica PWM ou Modulação de Largura de Pulos permite controlar a velocidade dos motores, mantendo o torque ainda que em baixas velocidades, garantindo partidas suaves mesmo com carga no eixo do motor.

Figura 28 - Esquema do circuito eletrônico da unidade UPC com os CIs L297 e L298

Figura 29 - Sinais de controle dos motores de passo

A combinação do CI 297 com o CI 298 possui inúmeras vantagens como baixo custo dos componentes e simplicidade na programação. A conversão do trem de pulsos de níveis TTL (*Transistor-Transistor Logic*) para um nível compatível de funcionamento dos motores é feita por meio do CI 298. Tal CI é um circuito monolítico de 15 pinos e duplo condutor de ponte completa de alta corrente e tensão. Além disso, foi projetado para aceitar os níveis padrões TTL e cargas indutivas tais como relés, solenoides, motores de corrente contínua e passo.

A alimentação dos motores é fornecida diretamente de uma entrada geral ligada à bateria, devido ao acionamento dos motores exigir uma drenagem de corrente alta, podendo ocasionar oscilações nos níveis de tensão fornecidos ao restante dos circuitos eletrônicos. Os diodos de D2 a D9 servem para proteger o circuito contra tensão reversa gerada pelos motores (Figura 30).

Figura 30 - Circuito eletrônico com os diodos de proteção contra tensão reversa da unidade UPC

Os diodos BYW96 ou diodos avalanche foram utilizados para a proteção do circuito contra picos de sobretensão reversa (Figura 30). Tais picos são gerados pelas comutações que ocorrem nas bobinas dos motores, fazendo com que a energia armazenada (magneticamente) em excesso retorne ao circuito. Pelo fato de tais picos terem rápida duração, os diodos avalanche possuem um rápido tempo de recuperação (~ 300 ns), garantindo uma boa “absorção” da energia de tais picos.

Na Figura 31 é ilustrada uma foto da placa de circuito impresso da Unidade de Comunicação e Sinais (UCS).

Figura 31 - Circuito eletrônico da unidade UPC

3.3.3.3 SISTEMA DE POSICIONAMENTO (SPM) E SENSORES (SIF)

O sistema de posicionamento (SPM) é composto por motores de passo, fusos e acopladores. Os motores de passo dos posicionadores X, Y e θ possuem as seguintes características:

- Os motores X e θ são de fabricação da SYNCRO LTDA, com ângulo de passo de $1,8^\circ$, número de passos por volta igual a 200, precisão de passo de $\pm 5\%$, peso de 1250g, tensão de alimentação nominal de $2,6V_{dc}$, corrente de 3,1A e número de fios igual a 6;

- O motor Y também é de fabricação da SYNCRO LTDA, com ângulo de passo de $1,8^\circ$, número de passos por volta igual a 200, precisão de passo de $\pm 5\%$, peso de 500g, tensão de alimentação de $5V_{dc}$, corrente de 1,0A e número de fios igual a 6.

Para todos os deslocamentos, o sistema possui sensores de início e fim de curso que são chaves mecânicas que desligam a alimentação de cada motor, caso o deslocamento das bases ultrapassar o início e o final do curso de cada eixo. O final do curso para o eixo X é de 0,82m, 0,27m para o eixo Y e 50° para o eixo θ .

3.3.3.4 MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DAQ) E GERADOR DE ALTA TENSÃO PARA A FONTE DE RAIOS X (FAT)

A DAQ (*Data Acquisition*) é um módulo de aquisição de dados de baixo custo e que possui conexão com computadores via USB. O modelo utilizado foi o USB-6008 da empresa National Instruments[®].

A DAQ USB-6008 possui taxa de amostragem de 10 kHz, 10 canais analógicos, sendo 8 entradas e 2 saídas (AI/AO), 12 canais digitais configuráveis como entrada ou saída (DI/DO), 1 canal contador de 32 bits (PFIO) configurável como saída ou entrada digital e duas fontes de tensão contínua (5V e 2,5V). As configurações utilizadas e o mapeamento das portas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Mapeamento dos canais da DAQ.

Configuração	Identificação	Descrição da Aplicação
Entradas Analógicas	AI0	Sensor início de curso – motor de passo para o posicionador x
	AI1	Sensor fim de curso – motor de passo para o posicionador x
	AI2	Sensor início de curso – motor de passo para o posicionador y
	AI3	Sensor fim de curso – motor de passo para o posicionador y
	AI6	Sensor início de curso – motor de passo para o posicionador θ
	AI7	Sensor fim de curso – motor de passo para o posicionador θ
Saída Analógica	AO0	Sinal analógico em tensão para a geração do sinal de <i>clock</i>
Saídas Digitais	P0.0	Ativação/desativação do motor de passo para o posicionador x
	P0.1	Ativação/desativação do motor de passo para o posicionador y
	P0.3	Ativação/desativação do motor de passo para o posicionador θ
	P0.4	Sentido horário/anti-horário do motor de passo para o posicionador x
	P0.5	Sentido horário/anti-horário do motor de passo para o posicionador y
	P0.7	Sentido horário/anti-horário do motor de passo para o posicionador θ
	P1.0	Endereço do canal A do multiplexador CD4052B
	P1.1	Endereço do canal B do multiplexador CD4052B
	P1.2	Ativação/desativação do gerador de alta tensão da fonte de raios X
Entrada Digital	P1.3	Monitoramento do nível de tensão da bateria
Contador 32 bits	PFIO	Contagem dos passos dos motores através da porta Y do CD4052B

O gerador de alta tensão da fonte de raios X (GAT) utilizado é da fabricante EIS – Scientific Instruments[®] e possui uma faixa de tensão de 0 a 50 kV e corrente máxima na faixa de 0,1 mA a 1,45 mA. Adicionalmente, possui um temporizador de ajuste manual que pode ser acionado através de sinal lógico por meio de um relé, conforme explanado no item 3.3.3.1. Pelo fato da fonte de raios X possuir uma janela de tempo maior em relação tempo de funcionamento do detector, o gerador sempre terá que ser inicializado primeiro em relação ao detector.

3.4 AUTOMAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

A rotina de programa da automação e aquisição de dados está baseada nos parâmetros metodológicos de análise e nos parâmetros geométricos necessários para a reconstrução das imagens tomográficas, tais como os movimentos de rotação e translação através dos passos angulares e lineares, respectivamente. O diagrama geral da automação e aquisição de dados do tomógrafo Compton está apresentado em blocos pela Figura 32. A rotina de aquisição dos dados é composta por três processos: (i) sistema de posicionamento, (ii) sistema de detecção e (iii) sistema mecânico/manual.

Figura 32 - Diagrama em blocos do esquema geral do tomógrafo Compton para uso em ambiente de campo.

Para uma melhor apresentação do fluxograma da rotina experimental da coleta de dados, o mesmo foi dividido em 3 partes: Figura 33 – Parte I, Figura 34 – Parte II e Figura 35 – Parte III. Adicionalmente, há símbolos apresentados na forma de círculos com uma numeração que representam conectores. Tais conectores ligam um determinado comando a uma outra região do fluxograma situada fora da página onde está sendo apresentado.

Foi realizada uma classificação dos processos em “*on-line*” e “*off-line*” e se deu ao fato de um ser realizado em campo com a fonte e detector de raios-X em funcionamento (“*on-line*”) e o outro podendo ou não ser realizado em campo (“*off-line*”). No processo “*off-line*”, uma vez coletado os dados, as imagens tomográficas podem ser reconstruídas *a posteriori* em qualquer lugar.

As Figuras 33, 34 e 35 ilustram um fluxograma, onde dois processos concorrentes são apresentados e que funcionam de forma assíncrona e serial (Figura 36). Um processo para o sistema de posicionamento (LabView) da sonda e outro para a aquisição dos dados pelo sistema de detecção (DppMCA – Amptek).

Figura 33 - Fluxograma da rotina do experimental do processo “on-line” do tomógrafo Compton de campo – Parte I.

Figura 34 - Fluxograma da rotina do experimental do processo “on-line” do tomógrafo Compton de campo – Parte II.

Figura 35 - Fluxograma da rotina do experimental do processo “on-line” do tomógrafo Compton de campo – Parte III.

Após a entrada de dados (Local, data, etc.) na rotina do *software*, o motor *X* se posiciona no centro (metade) do seu curso total e os motores *Y* e θ se movimentam para as posições iniciais das medidas. Visando a economia de energia elétrica, o motor *y*, após finalizar as medidas em um dado ângulo de rotação, se mantém em sua última posição e realiza novas medidas para outro valor angular de rotação, porém em outro sentido de rotação. Por isso, o valor da variável *y*, para diferentes valores angulares, ora é incrementado, ora é decrementado.

Para cada medida, a fonte de raios *X* e o detector são inicializados através de sinais lógicos enviados pelo *software* de controle. O desligamento de ambos é realizado de forma automática, pois ambos possuem temporizadores. No caso da

fonte, esta possui um temporizador de ajuste manual em seu painel frontal e no caso do detector o ajuste é realizado via *software* de controle. Para tal, a janela de tempo (t) é um dado de entrada no algoritmo. É importante lembrar que, devido ao fato do gerador de alta tensão da fonte levar um tempo para atingir o valor final de tensão e de corrente elétrica, o detector somente deve ser acionado após ter decorrido este tempo de estabilização do gerador de alta tensão da fonte (GAT).

Os dados coletados são armazenados em uma matriz denominada de matriz de projeções ($N(i,j)$). Os dados presentes na matriz de projeções serão corrigidos através de um algoritmo matemático que considera parâmetros físicos e matemáticos presentes nas medidas (item 3.5 desta tese).

Figura 36 - Fluxograma da rotina do experimental do processo "off-line" do tomógrafo Compton de campo.

Após a realização das correções, os resultados são disponibilizados para o *software* de retroprojeção filtrada para que seja obtida a imagem tomográfica Compton (Figura 36).

O *software* responsável pela interface com o usuário para o controle e automação do sistema de posicionamento opera em plataforma do LabVIEW[®]. Nessa interface o usuário entra com os seguintes dados: (i) o tipo de solo, (ii) o local da realização das medidas, (iii) as coordenadas geográficas do local obtidas através de um GPS (*Global Positioning System*), (iv) a janela de tempo da medida (t) e (v) com a data e hora do início da medidas (Figura 37). Adicionalmente, a interface possui um indicador de carga da bateria e de progresso da medida, além dos botões de *reset*, de inicialização/finalização das medidas e de confirmação dos dados de entrada <OK>.

O *software* responsável pelo sistema de detecção é o DppMCA que opera em plataforma da Amptek[®]. Nessa interface o usuário entra com os seguintes dados de configuração: (i) o tempo da janela de medida (t_m), (ii) o número total de medidas, (iii) o tempo de intervalo entre as medidas (t_i), (iv) o valor de tempo de pico (*peaking time*), (v) o valor do ganho, (vi) o número de canais e (v) o nome do arquivo no qual a interface salvará os dados da contagem dos fótons (Figura 38).

Antes dos processos de automação (posicionamento e detecção), se faz necessário executar procedimentos de forma mecânica/manual e que fazem parte do processo de planejamento experimental. Uma das atividades é a escolha do tipo do solo. Para cada tipo de solo a ser analisado, é necessário *a priori* ter a curva de calibração em densidade, pois através dessa é possível relacionar a quantidade de fótons espalhados com a densidade da área do solo a ser analisada. Uma vez escolhido o tipo de solo e o local onde este se situa, é realizado o ajuste manual da altura e profundidade no qual serão realizadas as medidas, para que não ocorra contato do solo com a sonda. Outra atividade é a sintonização dos valores de *thresholds* dos canais rápido e lento (Fast e LLD) que executado pelo DppMCA com a fonte de raios X desligada. Uma última atividade é realizar uma medida teste para, tendo-se uma determinada quantidade de fótons, ajustar os tempos da janela de tempo da fonte de raios X e do sistema de detecção. Essa medida se faz necessária para se aumentar a relação sinal/ruído das medidas e, desta forma, manter o erro intrínseco ao processo a um valor abaixo de 5% do número total de fótons detectados.

Figura 37 - Interface do software de medida do tomógrafo Compton de campo operando em plataforma do LabView®

Figura 38 - Interface do software do sistema de detecção DppMCA do tomógrafo Compton operando em plataforma da Amptek®, ilustrando o espectro em energia do Amerício 241 versus a contagem de fótons em escala logarítmica.

A maneira como os dados são organizados na matriz de projeções, o equacionamento do efeito Compton por trás das medidas e as correções realizadas para a construção das imagens serão apresentadas no próximo item.

3.5 ALGORITMO DE CORREÇÃO DA MATRIZ DE PROJEÇÕES E RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS

O escaneamento do solo é realizado através de duas varreduras: uma rotacional e a outra translacional. A varredura translacional é realizada tanto no sentido da largura como do comprimento da área amostrada. Para cada movimento de rotação, é realizada a varredura translacional do plano de interesse, bem como cada posição dará um determinado número de fótons obtidos em uma janela de tempo. Consequentemente, o conjunto de dados obtidos por cada rotação é denominado de projeção. As projeções são organizadas em uma matriz denominada de matriz de projeções. A próxima e última etapa é denominada de retroprojeção filtrada na qual as imagens tomográficas são reconstruídas a partir das projeções obtidas.

As medidas tomográficas possuem uma faixa de incerteza pelo fato de se utilizar de um instrumento que, por mais preciso que seja, não consegue obter um resultado igual ao valor real da grandeza física que se está medindo. Consequentemente há a necessidade de filtrar os dados oriundos das projeções visando melhorar a qualidade das medidas tomográficas, minimizando desta forma as incertezas.

A metodologia e a formulação matemática empregadas na reconstrução de imagens são descritas a seguir.

3.5.1 EQUACIONAMENTO DO EFEITO COMPTON

Como visto, utilizando a equação (8) é possível obter o número de fótons espalhados pelo Efeito Compton. Tal equação pode ser analisada em duas partes: (1) antes do espalhamento e (2) depois do espalhamento. Antes do espalhamento, a equação (8) pode ser representada pela seguinte equação:

$$S_{\xi i}^c(r_j) = \Phi_0 \cdot \frac{d\sigma^{KN}}{d\Omega} \cdot \delta_e \cdot dV \cdot d\Omega \cdot \exp\left(-\int_{s_1'} \mu_1(s) ds\right) \quad (12)$$

onde ξ_i é o ângulo entre o solo e o detector, i representa i -ésimo ângulo de rotação ($i=1,2,\dots,k$), r_j é a j -ésima posição de translação ($j=1,2,\dots,p$), $S_{\xi i}^c(r_j)$ é o número de fótons que colidiram com a matéria através do efeito Compton, $\mu_1(s)$ e s_1' é o coeficiente de atenuação linear e o caminho percorrido pelos fótons incidentes até o ponto de colisão com o elétron, respectivamente.

Após as colisões do feixe de fótons incidentes com os elétrons da matéria, tal feixe sofre outra atenuação linear em sua trajetória até o detector, pois os fótons gerados nas colisões (fótons Compton) possuem uma energia menor em relação aos incidentes. Por terem cedido parte de suas energias aos elétrons, pode-se considerar que o volume (voxel) da amostra, no qual ocorreram as colisões, é uma nova fonte de raios X. Portanto, a nova fonte emite fótons que são transmitidos diretamente para o detector, denominando-se esta parte da análise de transmissão direta.

Depois de ocorrer o espalhamento, a quantidade de fótons que efetivamente serão detectados $S_{\xi i}^r(r_j)$ pode ser obtida por:

$$S_{\xi i}^r(r_j) = S_{\xi i}^c(r_j) \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \exp\left(-\int_{s_2'} \mu_2(s) ds\right) \quad (13)$$

onde $\mu_2(s)$ é o coeficiente de atenuação linear da trajetória até o detector e s_2' é o caminho percorrido pelos fótons espalhados até o detector. Sendo Φ_1 igual a:

$$\Phi_1 = S_{\xi i}^c(r_j) \cdot t \cdot \varepsilon \quad (14)$$

e substituindo (14) em (13), tem-se:

$$S_{\xi i}^r(r_j) = \Phi_1 \cdot \exp\left(-\int_{s_2'} \mu_2(s) ds\right) \quad (15)$$

A quantidade de fótons detectados, dada pela equação (15), define uma reta de propagação que parte da fonte de espalhamento (voxel de espalhamento) até o

detector. Uma projeção tomográfica é um conjunto de retas de propagação que estão paralelas e igualmente espaçadas, obtidas em um ângulo de rotação ξ . Tal ângulo define o posicionamento do detector em relação à amostra (Figura 39). O elemento $S_{\xi i}^r(r_j)$ do vetor projeção $P_{\xi i}(i)$ representa o número de fótons detectados no i -ésimo ângulo de rotação ξ_i ($i=1,2,\dots,k$) e na j -ésima posição de translação r_j ($j=1,2,\dots,p$).

Sendo $\mu_2(s)$ o coeficiente de atenuação linear ao longo do percurso espalhamento-detector (raio $\overline{AB}$) e r_j a distância da origem até o raio $\overline{AB}$, a projeção $P_{\xi i}(i)$ para um ângulo ξ_i é dada por:

$$P_{\xi i}(i) = [S_{\xi i}^r(r_1) \ S_{\xi i}^r(r_2) \ \dots \ S_{\xi i}^r(r_p)] \quad (16)$$

onde p é o número total de medidas em um determinado ângulo ξ_i , $S_{\xi i}^r$ é a quantidade de fótons detectados no ângulo ξ e r_j que representa o posicionamento do raio $\overline{AB}$ no eixo r .

Figura 39 - Projeção paralela de $f(x,y)$. O voxel de espalhamento Compton é formado pela interseção do campo de visão da fonte de raios X e do detector.

O valor de r pode ser obtido em função do eixo de coordenadas x e y através da seguinte equação:

$$r = x \cdot \cos(\xi) + y \cdot \sin(\xi) \quad (17)$$

3.5.2 INCLUSÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DEVIDO À ABSORÇÃO

Nas reconstruções tomográficas pode-se observar uma tendência dos valores centrais das imagens reconstruídas sofrerem um acréscimo em relação aos dados externos devido à absorção presente nas posições de translação. Tal acréscimo pode causar um efeito de distorção na imagem reconstruída. Para tal, utiliza-se um modelo de restauração que ameniza tal distorção através de uma correção no número de fótons detectados, obtendo-se uma imagem mais próxima do objeto analisado. O modelo de restauração corrige as projeções através da multiplicação de cada um de seus elementos por uma função exponencial, conforme demonstra a equação (18):

$$S'_{\xi i}(r_j) = S^r_{\xi i}(r_j) \cdot \frac{\left(q \cdot \left(j - \frac{P}{2}\right)\right)^2}{p^2} + k \quad (18)$$

onde r_j é a j -ésima translação (r_j) ou posição do elemento $S^r_{\xi i}(r_j)$ no vetor da projeção $P_{\xi i}$, P é o número total de translações da projeção, q é o fator de simetria da função exponencial e k é o valor do incremento que é somado ao valor medido $S^r_{\xi i}(r_j)$.

Através do modelo de restauração é possível corrigir a contagem do número de fótons dado o diâmetro da amostra em estudo. Adicionalmente, corrige as contagens de bordas em relação às contagens no maior diâmetro da amostra.

3.5.3 INCLUSÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DO EFEITO DA POSIÇÃO DO FEIXE EM RELAÇÃO AO SOLO

Pelo fato dos raios gerados pelo efeito Compton não estarem todos a 90° em relação ao solo, condição em que não ocorrem distorções nas imagens, se faz

necessário incluir um segundo fator de correção. Tal fator é utilizado para cada amostra $S'_{\xi_i}(r_j)$ da projeção P_{ξ_i} na forma:

$$S''_{\xi_i}(r_j) = S'_{\xi_i}(r_j) \cdot \frac{D_{vd}}{\sqrt{D_{vd}^2 + (D_{vd} \cdot \text{sen}(\xi_i))^2}} \quad (19)$$

onde D_{vd} é a distância entre o espalhamento Compton e o detector.

3.5.4 INCLUSÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DO EFEITO DA POSIÇÃO DO DETECTOR EM RELAÇÃO AO SOLO

As medidas tomográficas com os fótons Compton em ambiente de campo amostram uma região de interesse no interior do solo (Figura 40). Considerando-se, geometricamente, que o feixe espalhado está representado pela reta $\overline{CA}$, o segmento de reta $\overline{DA}$ representa o trecho da trajetória do feixe fora da região de interesse (g). A segunda correção tem como finalidade compensar a atenuação sofrida pelo feixe fora da região de interesse. Através da relação entre as trajetórias dentro (m) e fora (g) da região de interesse para cada ângulo de inclinação do detector em relação ao solo, realiza-se a correção na quantidade de fótons detectados e corrigidos anteriormente $S'_{\xi_i}(r_j)$.

Considerando o triângulo retângulo ABC, têm-se:

- Cateto w :

$$w = e + d \quad (20)$$

- Cateto z :

$$z = w \cdot \tan(\varphi) \quad (21)$$

- Hipotenusa b :

$$b = (z^2 + w^2)^{1/2} \quad (22)$$

ou

$$b = g + m \quad (23)$$

onde w representa profundidade da medida no solo.

Dado o ângulo de rotação ξ , o ângulo β é dado por:

$$\varphi = (90^\circ - \xi) \quad (24)$$

Figura 40 - Diagrama esquemático da geometria de análise da correção da atenuação Compton.

Inserindo a equação (21) na (22), tem-se:

$$b = w \cdot \sqrt{(\tan^2(\varphi) + 1)} \quad (25)$$

Considerando-se os triângulos retângulos BCD e ABD, temos as seguintes relações:

$$\begin{cases} w^2 = m^2 + n^2 \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} z^2 = n^2 + g^2 \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} n^2 = w^2 - m^2 \end{cases} \quad (28)$$

onde a é a altura do triângulo ABC.

A equação do Teorema de Stewart aplicada no triângulo ABC é dada por:

$$g \cdot w^2 + m \cdot z^2 = g \cdot m \cdot b + n^2 \cdot b \quad (29)$$

Inserindo as equações (27), (28), (29) e (24) na (30), tem-se:

$$g \cdot (m^2 + n^2) + m \cdot (n^2 + g^2) = g \cdot m \cdot b + (w^2 - m^2) \cdot b$$

$$g \cdot (m^2 + w^2 - m^2) + m \cdot (z^2 - g^2 + g^2) = g \cdot m \cdot b + (w^2 - m^2) \cdot b$$

$$g \cdot w^2 + m \cdot z^2 = g \cdot m \cdot b + (w^2 - m^2) \cdot b$$

$$(b - m) \cdot w^2 + m \cdot z^2 = (b - m) \cdot m \cdot b + w^2 \cdot b - m^2 \cdot b$$

$$w^2 \cdot b - m \cdot w^2 + m \cdot z^2 = m \cdot b^2 - m^2 \cdot b + w^2 \cdot b - m^2 \cdot b$$

$$-m \cdot w^2 + m \cdot z^2 = m \cdot b^2 - m^2 \cdot b - m^2 \cdot b$$

$$(z^2 - w^2) \cdot m - m \cdot b^2 = -2 \cdot m^2 \cdot b$$

$$(z^2 - w^2 - b^2) \cdot m = -2 \cdot b \cdot m^2$$

$$\therefore m = \frac{b^2 + w^2 - z^2}{2 \cdot b} \quad (30)$$

O valor de g é dado por:

$$g = b - m \quad (31)$$

Tendo-se os valores de m e g , a equação de correção é dada por:

$$Fc = 1 + \left(\frac{g}{m} \right) \quad (32)$$

Aplicando a equação de correção nas medidas, tem-se a seguinte equação:

$$S'''_{\xi i}(i) = S''_{\xi i}(i) \cdot \left[1 + \left(\frac{g}{m} \right) \right] \quad (33)$$

Através da equação de correção (33) é possível compensar as baixas contagens nos ângulos de rotação mais baixos (Figura 41) por um fator de correção dado pela equação (32).

Portanto a projeção corrigida $P^C_{\xi i}(i)$ para um ângulo ξ_i é dada pelo seguinte vetor:

$$P^C_{\xi i}(i) = [S'''_{\xi i}(r_1) \quad S'''_{\xi i}(r_2) \quad \dots \quad S'''_{\xi i}(r_q)] \quad (34)$$

Figura 41 - Perfil da equação do fator de correção do efeito da posição do detector em relação ao solo.

Sendo k o número total de rotações, a matriz de projeções é dada por:

$$N(\xi, r) = \begin{bmatrix} S'''_{\xi 1}(r_1) & S'''_{\xi 1}(r_2) & \dots & S'''_{\xi 1}(r_q) \\ S'''_{\xi 2}(r_1) & S'''_{\xi 2}(r_2) & \dots & S'''_{\xi 2}(r_q) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S'''_{\xi k}(r_1) & S'''_{\xi k}(r_2) & \dots & S'''_{\xi k}(r_q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^C_{\xi 1}(1) \\ P^C_{\xi 2}(2) \\ \vdots \\ P^C_{\xi k}(k) \end{bmatrix} \quad (35)$$

3.5.5 A RECONSTRUÇÃO DAS IMAGENS

Uma vez obtida a matriz de projeções, a próxima etapa é reconstruir as imagens tomográficas Compton através do algoritmo de retroprojeção filtrada⁵⁴. De maneira simplificada, a Figura 42 apresenta em diagrama de blocos as operações matemáticas presentes no algoritmo.

Figura 42 - Diagrama em blocos das operações matemáticas do algoritmo de retroprojeção filtrada

O algoritmo pode ser descrito como uma derivação do teorema das seções de Fourier, no qual para se iniciar a derivação, utiliza-se o uso das coordenadas polares (ω, ξ) ao invés das coordenadas retangulares (u, v) no domínio da frequência.

A transformada de Fourier de uma projeção paralela de uma imagem $f(x, y)$, dado um ângulo ξ , é equivalente à fatia de uma transformada bidimensional de $f(x, y)$ definida com o $F(u, v)$ e subentendendo-se um ângulo ξ com o eixo u . Desta maneira,

a transformada de Fourier da projeção $P_\xi(r)$ fornece os valores sobre uma linha no domínio frequencial. Com isso, sua transformada de Fourier é dada por:

$$R_\xi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P_\xi(r) \cdot e^{-j2\pi\omega t} dt \quad (36)$$

Considerando $u = \omega \cdot \cos \xi$ e $v = \omega \cdot \sin \xi$, tem-se:

$$R_\xi(\omega) = F(\omega, \xi) \quad (37)$$

Utilizando as coordenadas polares (ω, ξ) no lugar do sistema de coordenada retangulares (u, v) no domínio da frequência, a imagem $f(x, y)$ é dada por:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \int_0^{2\pi} \int_0^\infty F(\omega, \xi) \cdot e^{j2\pi\omega(x \cdot \cos \xi + y \cdot \sin \xi)} \omega d\omega d\xi \\ f(x, y) &= \int_0^\pi \int_0^\infty F(\omega, \xi) \cdot e^{j2\pi\omega(x \cdot \cos \xi + y \cdot \sin \xi)} \omega d\omega d\xi + \\ &\quad \int_0^\pi \int_0^\infty F(\omega, \xi + 180) \cdot e^{j2\pi\omega(x \cdot \cos \xi + 180 + y \cdot \sin \xi + 180)} \omega d\omega d\xi \end{aligned} \quad (38)$$

Atribuindo $F(\omega, \xi + 180^\circ) = F(-\omega, \xi)$ e inserindo a equação (17) na equação (38), pode-se escrever $f(x, y)$ com o auxílio do teorema das seções de Fourier e a expressão para r em função de x e y como definido pela transformada inversa de Fourier, ou seja:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \int_0^\pi \left[\int_{-\infty}^\infty F(\omega, \xi) \cdot |\omega| e^{j2\pi\omega t} d\omega \right] d\xi \\ f(x, y) &= \int_0^\pi \left[\int_{-\infty}^\infty R_\xi(\omega) \cdot |\omega| e^{j2\pi\omega t} d\omega \right] d\xi \end{aligned} \quad (39)$$

A construção da equação (39) em sua forma filtrada e retroprojetada exige separar a equação em duas operações diferentes. A primeira é filtrar os dados das projeções para cada ângulo ξ , da seguinte maneira:

$$Q_{\xi}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\xi}(\omega) |\omega| e^{j2\pi\omega t} d\omega \quad (40)$$

Após a filtragem, as projeções são retroprojetadas para se obter a função da imagem:

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} Q_{\xi}(x \cos \xi + y \sin \xi) d\xi \quad (41)$$

Para cada pixel (x, y) no plano da imagem, existirá um valor de r (equação 37) para cada projeção filtrada, Q_{ξ} , obtida no ângulo ξ .

A versão discretizada da equação (40) é dada por:

$$Q_{\xi}(n\tau) = \tau \sum_{k=0}^{n-1} h(n\tau - k\tau) P_{\xi}(k\tau) \quad n = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (42)$$

onde τ representa o intervalo de amostragem das projeções e $P_{\xi}(k\tau) = 0$ para $k < 0$ e $k > n-1$.

Uma vez que os valores das projeções são medidos com um intervalo τ , o filtro rampa $h(n)$ deve ser aplicado no mesmo intervalo τ para que se execute o processamento digital. As amostras $h(n\tau)$ são dadas por:

$$h(n\tau) = \begin{cases} \frac{1\tau^2}{4}, & n = 0 \\ 0, & n = \text{par} \\ -\frac{1}{n^2 \pi^2 \tau^2}, & n = \text{ímpar} \end{cases} \quad (43)$$

O uso do filtro rampa se deve à utilização do algoritmo de retroprojeção filtrada, no qual utiliza tal filtro para eliminar ruídos intrínsecos ao processo de reconstrução.

A implementação no domínio da frequência das projeções filtradas $Q_{\xi i}$, sob a forma de equação, pode ser expressa como:

$$Q_{\xi}(n\tau) = \tau \cdot IFFT \{ FFT[P_{\xi}(n\tau)] FFT[h(n\tau)] \} \quad (44)$$

onde FFT e IFFT representam as transformadas rápidas de Fourier e sua inversa, respectivamente.

Após a filtragem, o próximo passo no algoritmo é a retroprojeção das projeções filtradas que fornece a imagem tomográfica e tem sua aproximação discretizada dada por:

$$f(x, y) = \frac{\pi}{k} \sum_{j=1}^k Q_{\xi_j} (x \cdot \cos \xi_j + y \cdot \sin \xi_j) \quad (45)$$

onde k ângulos ξ_j são os valores discretos de Q_{ξ} para cada $P_{\xi}(r)$ conhecido.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CALIBRAÇÃO EM DENSIDADE DE SOLOS

Neste item são abordados os resultados da simulação computacional para predição do número de fótons espalhados pelo Efeito Compton, os resultados laboratoriais com o arranjo experimental Compton, os resultados da calibração em densidade de solos e os resultados com a tomografia Compton aplicada em campo. A sequência de apresentação é cronológica e esta organizada da seguinte maneira: (4.1) Resultados da Simulação Computacional, (4.2) Obtenção de Fotopicos Compton, (4.3) Calibração em Densidade para Solos Agrícolas, (4.4) Tomografia Compton: Amostras de Solo e (4.5) Tomografia Compton: Medida de Campo com Latossolo Roxo.

4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os resultados da simulação computacional, apresentada no item 3.1, utilizou a equação (10), na qual a equação (8) foi normalizada em função do diferencial do volume de interseção dV e do diferencial do ângulo sólido $d\Omega$. A simulação foi organizada em três formas de abordagens: (i) variação angular Compton (θ), (ii) variação energética dos fótons incidentes (E_0) e (iii) variação do fluxo dos fótons incidentes (Φ_0). Adicionalmente, tais resultados são apresentados em quatro saídas gráficas: (i) gráficos polares para a variação angular Compton de 0 a 180°, (ii) gráficos semi-logarítmicos para a variação de energia dos fótons incidentes de 0,5 a 100 keV, (iii) gráficos lineares e logarítmicos para a variação de fluxo de fótons incidentes de 1k a 150k fótons por cm^2 e por segundos e (iv) tabelas de parâmetros estatísticos dos resultados obtidos pela equação (10) para as variações angular, energética e do fluxo dos fótons incidentes. A faixa de variação de energia (0,5 a 100 keV) foi dividida em três sub-faixas: (i) 0,5 a 20,0 keV, (ii) 20,1 a 40,0 keV e (iii) 40,1 a 100 keV, para uma análise mais detalhada.

Para as demais grandezas físicas presentes na equação (10) considerou-se: (i) um detector com eficiência de detecção na região de fotopico de 2%, (ii) um tempo de amostragem variável no intervalo de 10 a 100s, com um incremento de 10s a partir do valor inicial, (iii) o composto químico Dióxido de Silício (SiO_2) como

amostra, o qual apresenta densidade física (ρ) igual a 2,32 g/cm³, número atômico efetivo (Z_{ef}) igual a 11,56 e massa molar igual a 60,07 g/mol, bem como (iv) um arranjo geométrico para experimentação com o efeito Compton.

Os parâmetros do arranjo geométrico utilizados neste estudo de caso foram: (i) o posicionamento do detector (ângulo de espalhamento Compton (θ)) variando entre 0 e 180°, (ii) porta-amostra com dimensões de 5,40 cm de largura por 5,40 cm de comprimento e (iii) distância entre parede do porta-amostra e centro do porta-amostra (x'_1) igual a 2,70 cm.

A variação da distância percorrida pelo fóton Compton dentro do porta-amostra (x'_2) está ilustrada na Figura 44.

O fator do coeficiente de atenuação linear, denominado neste estudo de *cfat*, correlaciona a distância x'_1 com o coeficiente de atenuação linear μ_1 , assim como a distância x'_2 com o coeficiente de atenuação linear μ_2 . A variável x'_1 possui valor constante pelo fato da fonte não se deslocar. Por outro lado, a variação do posicionamento do detector, através do ângulo de espalhamento Compton (θ), influencia na variação do *cfat* através das variáveis x'_2 e μ_2 .

Figura 43 - Saída gráfica para a avaliação da variação da distância percorrida pelo fóton Compton (x'_2) na amostra em função do ângulo de espalhamento Compton (θ).

Na Figura 45 está ilustrada a saída gráfica para a variação do *cfat*. A variação angular Compton influencia a secção de choque de Klein-Nishina, conforme se pode notar pela saída gráfica ilustrada pela Figura 46.

Figura 44 - Saída gráfica para a avaliação da variação do fator coeficiente de atenuação linear (*cfat*) em função do ângulo de espalhamento Compton (θ) em 50 keV.

É importante ressaltar que a influência do posicionamento do detector, em função do ângulo Compton, impacta na energia dos fótons espalhados (E), na seção de choque de Klein-Nishina e no coeficiente de atenuação linear (μ_2) para a energia de espalhamento (E_0). Desta forma, a análise do efeito Compton, principalmente em relação à atenuação, pode ser separada em duas etapas: antes e depois do espalhamento. Para uma mesma energia incidente, a interação da radiação com a matéria pode ter a predominância do efeito Compton antes da ocorrência da colisão entre fóton e elétron e após tal colisão a predominância passar a ser do efeito fotoelétrico, devido à perda energética sofrida pelo fóton.

Figura 45 - Saída gráfica para a avaliação da variação da seção de choque de Klein-Nishina em função do ângulo de espalhamento Compton (θ) nas energias de incidência de 10 keV, 50 keV e 100 keV.

A motivação da ilustração dos resultados por saídas gráficas, geradas pela equação (10), está fundamentada na necessidade de se avaliar as contribuições do ângulo Compton (θ), da energia (E_0) e do fluxo (Φ_0) de incidência dos raios X na predição do número de fótons detectados. Para tal, normalizou-se parâmetros geométricos do sistema tais como o elemento de ângulo sólido ($d\Omega$) e o elemento de volume (dV). A análise do comportamento da detecção de fótons Compton por meio das variações angular, energética e de fluxo, torna possível estimar o melhor posicionamento do detector e os níveis adequados de tensão e corrente elétrica de alimentação da fonte de raios X, respectivamente. Desta forma, avaliou-se a detecção dos fótons Compton e suas respectivas figuras de mérito em toda a faixa de valores das grandezas físicas de interesse.

Na Figura 47 estão ilustrados dois exemplos de saídas gráficas geradas pelo modelo de simulação com base na equação (10). Tais exemplos evidenciam a detecção de fótons Compton em relação à variação angular Compton.

Observa-se pelas Figuras 47(a) e 47(b) que a geração de fótons Compton foi inversamente proporcional ao aumento do ângulo de espalhamento. Adicionalmente, a figura de mérito obtida, cujo formato é similar a de uma meia hipérbole, apresentou um comportamento diretamente proporcional ao aumento do tempo de amostragem. Adicionalmente, observaram-se três regiões de destaque nas figuras de mérito obtidas: a primeira entre 0° e 45° , a segunda entre 45° e 135° e a terceira e última entre 135° e 180° . Os valores do ângulo θ iguais a 45° e 135° representam pontos de inflexão no comportamento dos fótons detectados. A justificativa está no fato destes ângulos representarem uma maior distância percorrida pelo fóton espalhado dentro da amostra (Figura 44). Nestes valores angulares situam-se as diagonais do porta amostra, cujo formato é quadrangular. Nesta situação, x'_2 atinge seu valor máximo e por consequência diminui a quantidade de fótons Compton por elemento de volume e ângulo sólido. A variável $cfat$ é inversamente proporcional à distância x'_2 (Figura 45) e diretamente proporcional à equação da detecção de fótons Compton (equação 10).

Figura 46 - Saídas gráficas para a avaliação da variação da angular do espalhamento Compton (θ) com base na equação normalizada: (a) $E_0 = 50$ keV e $\Phi_0 = 15$ k e (b) $E_0 = 100$ keV e $\Phi_0 = 150$ k.

A Tabela 3 apresenta uma amostragem da influência da variação angular θ na quantidade de fótons Compton por elemento de volume (dV) e por elemento de ângulo sólido ($d\Omega$). Para tal análise utilizou-se parâmetros estatísticos como desvio padrão (σ), variância (σ^2) e coeficiente de variação (CV). Consideraram-se um tempo de amostragem igual à 20s, fluxos de fótons incidentes iguais a 15 k e 150 k e as energias incidentes de interesse iguais a 50 keV e 100 keV para esta amostragem. A justificativa se deu pelo fato da ocorrência de detecção de fótons Compton nestes valores de energia.

Tabela 3 - Parâmetros estatísticos dos resultados obtidos pela variação do ângulo Compton para o tempo de 20s: variância (σ^2), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV).

Variação Angular Compton (θ) – 0-180° - Tempo de 20s				
Parâmetros	Energia (E_0) [keV]/Fluxo de Fótons Incidentes (Φ_0) [fótons/(s.cm ²)]			
Estatísticos	$E_0 = 50$		$E_0 = 100$	
	$\Phi_0 = 15k$	$\Phi_0 = 150k$	$\Phi_0 = 15k$	$\Phi_0 = 150k$
σ^2	1,09	109,05	7,53	752,67
σ	1,04	10,44	2,74	27,43
CV	64%	64%	42%	42%

Nesta amostragem, nota-se que a variação angular Compton com a variação energia incidente (E_0) de 50 keV para 100 keV, acarreta uma redução no valor CV de 64% para 42%, respectivamente. Não houve mudanças no CV, em um mesmo valor de E_0 , para a variação de Φ_0 . Tal comportamento deve-se ao fato da variação energética se comportar como uma função exponencial crescente, ou seja, quanto maior for a energia dos fótons incidentes, menor será a variação da quantidade de fótons espalhados, pois a função tende a se estabilizar em torno de um valor alto de E_0 . Em um mesmo valor de E_0 , não houve alteração no valor de CV, em relação à variação de Φ_0 , pelo fato desta ter um comportamento linear.

Na Figura 48 estão ilustrados três exemplos de saídas gráficas geradas pelo modelo de simulação com base na equação (10) para a variação de energia dos fótons incidentes de 40 a 100 keV. Tal figura ilustra a direta proporcionalidade que a variação do fluxo de fótons incidentes na quantidade de fótons espalhados pelo efeito Compton.

Na faixa energética de 0,5 a 20 keV, não houve a probabilidade de detecção de fótons por espalhamento Compton e o valor máximo simulado foi de aproximadamente 1×10^{-13} .

Através da análise dos gráficos apresentados é possível observar um comportamento exponencial ascendente na contagem dos fótons espalhados. A justificativa de tal comportamento se deu pela influência que a energia incidente E_0 exerceu sobre a energia de espalhamento E sobre o coeficiente de atenuação linear μ_1 , bem como indiretamente, através da energia E , sobre μ_2 .

Figura 47 - Saídas gráficas para a avaliação da variação da energética dos fótons incidentes (E_0) com base na equação normalizada para $\theta = 90^\circ$ e para faixa energética de E_0 de 40 a 100 keV: (a) $\Phi_0 = 1k$, (b) $\Phi_0 = 15k$ e (c) $\Phi_0 = 150k$.

Os coeficientes de atenuação linear têm um comportamento exponencial descendente com o aumento das energias E_0 e E dos fótons e, pelo fato da variável $cfat$ ser inversamente proporcional, o resultado é uma exponencial ascendente. Este comportamento se refletiu no resultado final. Além do coeficiente de atenuação linear, a energia E_0 também influenciou inversamente a secção de choque de Klein-Nishina, conforme ilustrou a Figura 45. Na faixa entre 20 e 40 keV, não exemplificada graficamente, não houve a probabilidade de ocorrência de detecção de fótons Compton para os seguintes casos:

- a) $\theta = 30^\circ$ - $\Phi_0 = 1k$ [fótons/(s.cm²)];
- b) $\theta = 90^\circ$ - $\Phi_0 = 1k$ e $15k$ [fótons/(s.cm²)];
- c) $\theta = 120^\circ$ - $\Phi_0 = 1k$ e $15k$ [fótons/(s.cm²)].

Para as demais situações houve a probabilidade de detecção de fótons Compton. Na faixa entre 40 e 100 keV, houve a detecção de fótons Compton para todos os três valores simulados de θ (30° , 90° e 120°) e para os três valores simulados de Φ_0 (1k, 15k e 150k [fótons/(s.cm²)]).

Na Tabela 4 está apresentada a influência da variação energética (40 a 100 keV) dos fótons incidentes na quantidade de fótons espalhados por elemento de volume (dV) e por ângulo sólido (dΩ) em termos de dados estatísticos como o desvio padrão (σ), variância (σ^2) e coeficiente de variação (CV). Nesta, a informação apresentada demonstra que houve uma variação decrescente no valor de CV devido à variação angular na faixa energética de E_0 para o intervalo de 40 keV a 100 keV. Tal comportamento foi ilustrado na Figura 47 e na Figura 48, onde a variação dos fótons espalhados com ângulos menores a 90° tem um comportamento inversamente proporcional ao aumento angular e para valores superiores a 90° , diretamente proporcional, porém assimétrico em relação ao eixo vertical (90°). Para um mesmo valor de θ , a variação de Φ_0 não modificou o valor de CV, mantendo a mesma variação angular apresentada anteriormente.

Tabela 4 - Parâmetros estatísticos dos resultados obtidos pela variação da energia dos fótons incidentes para o tempo de 20s: variância (σ^2), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV).

Parâmetros Estatísticos	Ângulo Compton (θ) & Fluxo de Fótons Incidentes (Φ_0) [fótons/(s.cm ²)]					
	$\theta = 30^\circ$		$\theta = 90^\circ$		$\theta = 120^\circ$	
	$\Phi_0 = 15k$	$\Phi_0 = 150k$	$\Phi_0 = 15k$	$\Phi_0 = 150k$	$\Phi_0 = 15k$	$\Phi_0 = 150k$
σ^2	9,10	910,18	2,56	255,49	2,29	229,33
σ	3,02	30,17	1,60	15,98	1,51	15,14
CV	45%	45%	46%	46%	52%	52%

Na Figura 49 estão ilustrados três exemplos de saídas gráficas geradas pelo modelo de simulação com base na equação (10) para a variação do fluxo dos fótons incidentes de 1k a 150 k [fótons/(s.cm²)]. Para um ângulo θ igual a 90°, nota-se pelos três exemplos o efeito causado pela variação energética dos fótons incidentes E_0 na quantidade de fótons Compton detectados.

Observou-se um comportamento linear da detecção de fótons Compton, no qual a variação dos fótons Compton foi diretamente proporcional ao aumento do fluxo dos fótons incidentes. Tal comportamento é facilmente explicado pelo fato dos fótons detectados por espalhamento Compton serem produtos da colisão dos fótons incidentes com os elétrons da camada mais externa do átomo. Como esperado, não houve a ocorrência de fótons Compton para a energia E_0 igual a 10 keV.

Para analisar a coerência entre as três simulações realizadas com a equação normalizada, considerou-se a amostragem dos valores de E_0 igual a 100 keV, θ igual a 30°, Φ_0 igual a 150k [fótons/(s.cm²)] e janela de tempo igual a 100s (Figura 50). Em todas as três simulações a quantidade de fótons Compton detectados foi de aproximadamente 450 [fótons/(sr.cm³)].

A Tabela 5 apresenta a influência da variação do fluxo dos fótons incidentes na quantidade de fótons espalhados por elemento de volume (dV) e por ângulo sólido ($d\Omega$) em termos de parâmetros estatísticos como desvio padrão (σ), variância (σ^2) e coeficiente de variação (CV).

Figura 48 - Saídas gráficas para a avaliação da variação do fluxo dos fótons incidentes (Φ_0) com base na equação normalizada para $\theta = 90^\circ$: (a) $E_0 = 10$ keV, (b) $E_0 = 50$ keV e (c) $E_0 = 100$ keV.

Figura 49 - Comparação das saídas gráficas produzidas com base na equação normalizada: (a) $E_0 = 100$ keV e $\Phi_0 = 150k$, (b) $\theta = 30^\circ$ e $\Phi_0 = 150k$ e (c) $E_0 = 100$ keV e $\theta = 30^\circ$.

Tabela 5 - Dados estatísticos dos resultados obtidos pela variação do fluxo dos fótons incidentes para o tempo de 20s: variância (σ^2), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV).

Parâmetros Estatísticos	Variação do fluxo dos fótons incidentes – 1k-150k - Tempo de 20s					
	Ângulo de Espalhamento Compton / Energia dos Fótons Incidentes					
	30°		90°		120°	
	50keV	100keV	50keV	100keV	50keV	100keV
σ^2	59,44	718,27	13,30	191,56	5,53	151,63
σ	7,71	26,80	3,65	13,84	2,35	12,31
CV	57%	57%	57%	57%	57%	57%

Os resultados apresentados na Tabela 5 demonstraram que a variação do fluxo de fótons incidentes não modificou o valor de CV (57%) com a alteração angular e energética. A variação do fluxo de fótons incidentes influenciou diretamente no resultado final do equacionamento da detecção de fótons espalhados por efeito Compton (equação 10). Por outro lado, os valores de θ e E_0 influenciaram nos resultados de outras variáveis dependentes como $cfat$ e KN .

Adicionalmente, é possível observar que as saídas gráficas viabilizam observar o comportamento das variáveis em função da geometria de medida considerada.

Na Tabela 6 está demonstrado em qual configuração destes parâmetros ocorre a detecção de pelo menos um fóton espalhado por efeito Compton. Pelos dados que a Tabela 6 apresenta, nota-se que a energia dos fótons incidentes para a detecção de pelo menos um fóton espalhado pelo efeito Compton, para as dadas condições de contorno, apresenta uma proporcionalidade direta com o ângulo de espalhamento Compton (θ) e uma proporcionalidade inversa com o fluxo dos fótons incidentes (Φ_0).

Com os resultados obtidos, observou-se que as saídas gráficas produzidas pela simulação computacional permitiram a visualização da influência que parâmetros como energia e fluxo de fótons incidentes, bem como o ângulo de espalhamento, exercem no resultado final do espalhamento Compton. Também, verificou-se que o fluxo incidente de fótons (Φ_0) devido ao seu impacto isolado no equacionamento normalizado produz uma variação linear nos fótons Compton detectados. Por outro lado, variáveis independentes como o ângulo Compton (θ) e a energia dos fótons incidentes (E_0) exercem uma dupla influência, de natureza não linear, no espalhamento Compton pelo fato de impactarem a secção de choque

diferencial de Klein-Nishina, bem como o fator relacionado aos coeficientes de atenuação linear considerados em arranjos experimentais, cujas variações acompanham uma exponencial decrescente.

Tabela 6 - Valores de energia [keV] nos quais há a probabilidade de detecção de pelo menos 1 fóton Compton por unidade de volume e por unidade de ângulo sólido [fóton/(cm³.sr)]

Tempo de Amostragem [s]	Fluxo de Fótons Incidentes (Φ_0) [fótons/(s.cm ²)] & Ângulo Compton (θ)								
	$\Phi_0 = 1k$			$\Phi_0 = 15k$			$\Phi_0 = 150k$		
	$\theta=30^\circ$	$\theta=90^\circ$	$\theta=120^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=90^\circ$	$\theta=120^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=90^\circ$	$\theta=120^\circ$
10	-	-	-	48,2	54,0	57,5	39,7	41,8	43,9
20	-	-	-	44,7	48,5	51,3	38,2	39,8	41,9
30	-	-	-	43,2	46,3	48,8	37,4	39,0	40,8
40	65,5	-	-	42,3	45,0	47,4	36,9	38,3	40,2
50	59,5	-	-	41,5	44,1	46,5	36,5	37,9	39,7
60	56,3	-	-	41,0	43,4	45,7	36,2	37,5	39,3
70	54,3	70,5	91,0	40,6	42,9	45,2	35,9	37,2	39,0
80	53,0	65,0	73,0	40,0	42,5	44,5	35,7	37,0	38,8
90	51,9	61,6	67,6	39,5	42,1	44,2	35,6	36,8	38,5
100	51,8	59,4	64,6	39,7	41,7	43,8	35,4	36,6	38,3

O estudo de caso considerado para a validação do modelo mostrou que a variação angular na energia de 50 keV foi o parâmetro da avaliação que apresentou o maior coeficiente de variação (CV), com o valor de 64%. A explicação está na natureza exponencial da função do coeficiente de atenuação linear na qual sua variação aumenta com a diminuição da energia dos fótons incidentes. Para as condições de contorno consideradas, o valor mínimo da energia incidente para detecção de pelo menos um fóton Compton foi de 35 keV. Tal energia de detecção pode ser melhorada caso detectores de maior eficiência na região do fotopico sejam utilizados.

4.2 OBTENÇÃO DE FOTOPICOS COMPTON

Nesse item é abordado as primeiras medidas realizadas com o sistema de detecção X-123SDD. Tal sistema muito contribuiu para a portabilização do tomógrafo Compton de uso em campo. A Figura 50 ilustra uma foto que compara as dimensões dos módulos eletrônicos de processamento de sinais, utilizados em conjunto com uma fotomultiplicadora (detector de cintilação), com as dimensões do sistema de detecção X-123SDD da Amptek.

Figura 50 - Foto dos sistemas de detecção X-123SDD e da fotomultiplicadora com os módulos de processamento de sinais.

A finalidade desse experimento foi visualizar os fotopicos Compton para diferentes tipos de solos agrícolas.

Os parâmetros experimentais utilizados foram:

- Detector posicionado a 90° em relação à fonte de raios X;
- Fonte de raios X com colimador esférico (3,0 mm) e o detector sem colimador;
- Uma cubeta de policarbonato;
- O valor de tensão da fonte de raios X utilizado foi de 49,5 kV;
- Valor de corrente elétrica igual a 1,50 mA;
- Distância fonte-amostra e distância amostra-detector iguais à 30 mm;
- Janela de tempo igual a 60 s;
- Número de medidas igual a 20 para cada amostra;
- As amostras de solos utilizadas foram: Nitossolo Vermelho Eutroférico, Latossolo Vermelho Acriférico, Argissolo Vermelho Amarelo com horizontes A e B e Areia Lavada de rio.

Os resultados foram organizados e amostrados na Tabela 7 e ilustrados na Figura 51.

Tabela 7 - Resultados obtidos com o sistema de detecção X-123SDD

Amostras	Média	Erro (Poisson)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação [%]	Energia [keV]
Feixe Livre	153305	392	4559	2,97	39,6
Cubeta Vazia	92482	304	2170	2,35	36,8
Nitossolo	93023	305	3215	3,46	36,8
Latossolo	93511	306	1424	1,52	36,8
Argissolo – HA	100758	317	1324	1,31	36,8
Argissolo – HB	101956	319	640	0,63	36,8
Areia Lavada	98220	313	1450	1,48	36,8

Figura 51 - Espectro obtido com o sistema de detecção X-123SDD da Amptek®

O sistema de detecção X-123SDD ilustrou todo o espectro de energia do experimento com os fotopicos Compton. No sistema X-123SDD todos os fotopicos foram visualizados com uma boa contagem de fótons na energia espalhada de 36,7 keV (canal 17). Todavia, os resultados apresentados neste item somente serviram de treinamento com o sistema de detecção X-123SDD e não podem ser utilizados na qualificação das amostras, pois não houve as calibrações em energia do sistema e em densidade.

4.3 CALIBRAÇÃO EM DENSIDADE PARA SOLOS AGRÍCOLAS

A finalidade da calibração em densidade de solos nas medidas com a tomografia Compton é obter uma curva que relacione o número de fótons espalhados com a densidade do solo analisado.

O solo selecionado para amostragem da calibração foi o Latossolo Roxo, que possui classificação textural argilosa com 43% de areia, 6% de silte e 49% de argila. A seleção do Latossolo Roxo para a calibração se deu pelo fato deste proporcionar uma boa formação de agregados após o processo de compressão, facilitando dessa forma sua acomodação nos porta amostras. Adicionalmente, é a classe de solo com maior representatividade no Brasil, aproximadamente 39%⁵⁵.

O Latossolo foi coletado no campo, seco ao ar, peneirado com a graduação de 2 mm e acondicionado em um recipiente de dimensões (13x6x7 cm). As medidas de densidade foram realizadas com três níveis de densidade: (i) 1,23 g/cm³ - solo sem ser sofrer compressão, (ii) 1,25 g/cm³ – solo pressionado com pesos metálicos de 1,2 kg e (iii) 1,34 g/cm³ – solo pressionado com os pesos metálicos mais pressão manual. A densidade foi medida calculando-se o volume do solo no interior do recipiente a cada compressão e a razão com sua respectiva massa.

Após a preparação das amostras, executou-se a calibração em energia do sistema de detecção X-123SDD. Para tal se faz necessário utilizar uma fonte em que pelo menos dois fotopicos do espectro sejam característicos, para que desta maneira o sistema de detecção obtenha uma função que relacione os canais com os valores de energia do espectro. A fonte selecionada foi a de Amerício (²⁴¹Am) que possui fotopicos característicos na energia de 59,6 keV e 6,0 keV, onde ambos foram selecionados para a calibração (Figura 52).

Os parâmetros de medida do multicanal do sistema de detecção, ajustados manualmente para a calibração, foram: (i) número de canais igual a 1024, (ii) ganho do amplificador de 20x, (iii) janela de tempo da medida igual a 60 segundos e (iv) tempo de pico igual a 1 µs. Os parâmetros de *threshold* lento (0,58%) e rápido (7,62) foram obtidos pela sintonia automática, na qual determina os níveis dos ruídos de fundo e ajusta os parâmetros de *threshold* a fim de filtrar tais ruídos. Tal sintonia é realizada com a fonte de raios X ou gama desligada.

Uma vez ajustados os parâmetros de medida, a próxima etapa foi a determinação do real nível de energia dos fótons incidentes. Teoricamente, a relação entre a tensão de alimentação da fonte de raios X (kV) e a energia dos fótons de raios X (keV) é dada pela equação (46), determinada experimentalmente para esta fonte de raios X. Nessa equação o valor da energia de incidência dos fótons é dado pelo valor da tensão de alimentação (kV) dividido por uma constante de correlação igual a 1,25.

Figura 52 - Espectro em energia do Amerício (^{241}Am) versus a contagem de fótons em escala logarítmica, utilizado na calibração do sistema de detecção X-123SDD.

Foram realizadas 100 medidas com fótons de espalhamento Compton para cada amostra de solo, com o nível de tensão elétrica igual a 48 kV e tempo de amostragem de 60 segundos. Obtido o fotopico na energia de 37,80 keV, os limites inferior e superior da região de interesse (ROI) do espectro foram selecionados através da simetria do formato gaussiano do espectro, no qual todos os fotopicos obtidos deviam se encontrar dentro da ROI. A região de interesse selecionada teve seu início em 35,97 keV e o seu final em 39,47 keV. Portanto, considerando a energia dos fótons incidentes igual a 37,80 keV, a constante de correlação real (kV/keV) foi de aproximadamente 1,27 (Figura 53).

A relação entre a energia dos fótons incidentes e a energia dos fótons espalhados pelo efeito Compton, conforme descrito anteriormente, é dada pela

equação (1). Aplicando o ângulo de espalhamento igual a 90° na equação (1), temos:

$$E = E_0 / (1 + 0,002 \cdot E_0) \quad (46)$$

onde E é a energia de incidência e E_0 a energia de espalhamento dos fótons. Através da equação (49) e dos valores limites da ROI de incidência, determinou-se a ROI da energia de espalhamento que teve seus limites em um intervalo de 33,6 a 36,2 keV, com um centróide igual a aproximadamente 35 keV.

Figura 53 - Espectro dos fotopicos das energias Incidente e Compton com o eixo da contagem dos fótons em escala logarítmica.

Após a determinação da ROI no espectro de energia dos fótons Compton, executou-se o experimento com as amostras de Latossolo Roxo com a disposição geométrica Compton e a metodologia adotada para o seu uso em campo (Figura 54). Os resultados estão apresentados na Tabela 8.

Figura 54 - Foto da disposição geométrica Compton em 90° utilizada para calibração em densidade.

Tabela 8 - Número de fótons Compton das amostras de Latossolo Roxo

Amostras de Solos	Média	Erro			CV [%]
		Poisson Médio	Desvio Padrão		
0	30120	174	17007		56,47
1	30884	176	17320		56,08
2	32087	179	17706		55,18

Para a obtenção da curva de calibração considerou-se a densidade como variável dependente (y) e o número de fótons como variável independente (x). O coeficiente de correlação R^2 obtido foi igual a 0,951 (Figura 55) e a curva de calibração é dada pela seguinte equação:

$$D = (6,08 \cdot 10^{-5} \cdot I_S - 0,51) \pm 0,35 \quad [\text{g/cm}^3] \quad (47)$$

onde D é a densidade do solo Latossolo Roxo e I_S é o número de fótons Compton detectados.

Figura 55 - Curva de calibração em densidade do Latossolo Roxo

Após a obtenção da curva de calibração em densidade, a próxima etapa foi gerar imagens tomográficas com amostras de solos através de ensaios realizados em ambiente laboratorial.

4.4 TOMOGRAFIA COMPTON: AMOSTRAS DE SOLO

As mesmas amostras de solo utilizadas no item anterior foram selecionadas para a obtenção de imagens tomográficas Compton em laboratório.

Primeiramente foi necessário ajustar a altura da sonda de forma a posicioná-la para se alcançar uma profundidade na medida de 2 cm. Para tal, ajustou-se manualmente a altura até o eixo mecânico de fixação da sonda estar a 11 cm de distância do solo. Após este ajuste, a mesa posicionadora foi nivelada manualmente através de suas três manivelas e com o auxílio de um nível.

Após a regulagem da mesa posicionadora, a próxima etapa foi ajustar os parâmetros experimentais do detector por meio do *software* de interface DppMCA fornecido pela Amptek®. Tal *software* possui um recurso que permite inserir o número de medidas pretendido e o tempo de atraso entre as medidas. Nesse estudo, a quantidade de medidas foi igual a 100 e o tempo de atraso entre as medidas foi igual a 30 segundos. A escolha desse valor se deu em virtude do tempo de funcionamento e desligamento do gerador de alta tensão da fonte de raios X. Os

demais parâmetros ajustados foram: (i) número de canais igual a 1024, (ii) ganho do amplificador de 20x, (iii) janela de tempo da medida igual a 60 segundos e (iv) tempo de pico igual a 1 μ s. Após a entrada dos valores dos parâmetros experimentais, executou-se a calibração do detector através do espectro do Amerício (Figura 55).

Pelo fato do detector não possuir controle por meio de sinais lógicos, houve a necessidade de sincronizar a execução de ambos os *softwares*, o de controle e automação da mesa posicionadora (LabVIEW) e o de aquisição de dados do detector (DppMCA). Para a sincronização, ajustou-se um dado de entrada do *software* de controle e automação no qual o usuário entra com o valor do tempo de atraso entre os acionamentos dos motores e do gerador de alta tensão da fonte de raios X. Esse tempo de ajuste foi de 102 segundos entre os acionamentos. A escolha desse valor se deve ao fato do gerador de alta tensão da fonte ter uma janela de tempo de 90 segundos, mais 10 segundos para o seu desligamento e 2 segundos necessários para a reinicialização do espectro por parte do DppMCA. A janela de tempo do gerador foi ajustada manualmente em seu painel frontal. O diagrama de sincronização está ilustrado na Figura 58.

Figura 56 - Diagrama de sincronização adotado para as medidas das amostras de solo

O tempo de 10 segundos entre o segundo acionamento do gerador e o segundo acionamento do detector se deve aos 10 segundos de estabilização do gerador de alta tensão da fonte de raios X. Na inicialização do algoritmo de medida, o motor θ leva 30 segundos para se deslocar até a chave de início de curso e depois

se posicionar no ponto inicial de medida e o motor y leva 20 segundos para a mesma tarefa inicial do θ . A partir do segundo acionamento, o motor y leva 2 segundos por deslocamento de cada passo e o motor θ leva 8 segundos.

Após a obtenção das medidas das projeções, os fótons detectados em cada região de interesse (ROI) foram organizados na forma de matriz (matriz de projeções). Tal matriz foi processada por meio de um algoritmo de correções apresentado no item 3.5 desta tese. Consecutivamente, um arquivo de dados da matriz de projeções foi gerado com a extensão 'dat'. Tal extensão é facilmente visualizada em qualquer editor de texto. Esse arquivo possui um cabeçalho com informações das medidas, tais como extensões de rotação e translação totais, e a contagem dos fótons para as variações dos passos linear e angular (Figura 57).

```
Comentario:Matriz de Projeções: Medidas Compton-Amostra_Solo_0
Translacao total (cm):10
Passo linear (cm):1
Rotacao total (graus):36
Passo angular (graus):4
Tempo de contagem (s):10
Energia (Kev):38.4

55086 39317 32271 27272 22978 20211 16613 14789 12282 11811
66788 47618 36480 29310 25228 21238 17970 15485 12969 11570
71428 52803 39043 31388 26636 22749 19840 17217 14981 12772
77978 55820 41916 32815 27421 23820 20831 17213 14986 13109
79049 57752 44991 34004 28488 24305 21914 18647 16047 13774
78231 59447 43781 34317 28795 24675 21477 18308 15685 14180
67429 55017 45399 35729 29151 24295 21112 18170 16014 13930
64667 48818 43709 35163 27778 23898 20028 17568 15515 13580
56614 44352 38345 33133 27480 22462 18400 16135 14161 12745
47710 33427 28628 28060 24714 21169 17597 14859 13228 11847
```

Figura 57 - Visualização do arquivo de dados 'dat' da matriz de projeções

Uma vez gerado o arquivo de dados, este foi processado pelo *software* VtkViewer que é responsável pela retroprojeção filtrada das projeções. O resultado da retroprojeção filtrada é visualizado em forma de uma imagem de extensão 'bmp'. Tal imagem pode ser apresentada de duas maneiras diferentes: (i) em tons de cinza ou escala de cinza (*Gray Scale*) ou (ii) colorida (*PseudoColors*). Em ambos os casos os pixels possuem valores que estão entre 0 e 255.

Na etapa seguinte, a imagem obtida é lida na forma de matriz, na qual seus elementos normalizados entre 0 e 255 foram convertidos da seguinte maneira: (i) os valores iguais a 0 foram substituídos pelo valor mínimo da contagem de fótons ou densidade, dependendo da análise, (ii) os valores iguais a 255 foram substituídos pelo valor máximo e (iii) os valores intermediários foram substituídos através da seguinte equação:

$$V_{dn} = V_{min} + \{V_n \cdot [(V_{max} - V_{min})/255]\} \quad (48)$$

onde V_{dn} é o valor normalizado, V_{min} é o valor mínimo, V_{max} é o valor máximo e V_n é o valor original da matriz. Após esta normalização, a imagem apresenta valores entre 1,0 e 1,6 g/cm³ (densidades com Latossolo no campo⁵⁶⁻⁵⁷).

Os resultados das amostras de Latossolo Roxo estão apresentados em função da densidade (escala de cinza e PseudoColor). As imagens estão representadas pelas Figuras 58, 59 e 60.

Pelas imagens tomográficas Compton apresentadas tanto em função da contagem de fótons como em função da densidade pode-se perceber que o espalhamento de fótons foi proporcional ao aumento da densidade das amostras. Adicionalmente, a faixa de variação amostrada pelas imagens em função da densidade está coerente com a ordem de grandeza de valores medida pelo volume e pela massa das amostras (1,23 a 1,34 g/cm³).

É importante ressaltar que os valores de densidade obtidos pelo volume e massa das amostras é na realidade um valor global da densidade do volume de solo e as imagens tomográficas mostram uma representação matemática da variação da densidade em relação a um plano desse volume. A metodologia utilizada no ensaio laboratorial foi também adotada para a realização de medidas no campo, as quais estão apresentadas mais à frente.

Figura 58 - Imagem tomográfica Compton da amostra de solo sem compactação em função da densidade em: (a) PseudoColor e (b) escala de cinza.

Figura 59 - Imagem tomográfica Compton da amostra de solo com a 1ª compactação em função da densidade em: (a) PseudoColor e (b) escala de cinza.

Figura 60 - Imagem tomográfica Compton da amostra de solo com a 2ª compactação em função da densidade em: (a) PseudoColor e (b) escala de cinza.

4.5 TOMOGRAFIA COMPTON: MEDIDA DE CAMPO COM LATOSSOLO ROXO

As medidas de densidade em campo foram realizadas na Fazenda Canchim pertencente a Embrapa e denominada de Embrapa Pecuária Sudeste, situada próxima à cidade de São Carlos – SP. O motivo da escolha da Fazenda Canchim para as medidas de campo foi pelo fato de ter sido o local onde as amostras de Latossolo Roxo foram coletadas (Figura 61).

Foram escolhidos dois sítios para se realizar o escaneamento tomográfico: (i) Sítio 1 (Latitude 21°57,68' S, Longitude 47°50,54' W): área com presença de gramíneas onde foi localizada uma região na qual o solo estava à amostra (Figura 68) e (ii) Sítio 2 (Latitude 21°57,68' S, Longitude 47°50,55' W): região de solo batido por servir de caminho de passagem de pessoas e veículos (Figura 62).

Figura 61- Foto aérea da Fazenda Canchim com as identificações dos sítios onde foram realizadas as medidas tomográficas Compton, obtidas pelo Google Maps.

Figura 62 - Foto do Sítio 1: área com presença de gramíneas com uma região onde o solo estava à amostra.

Figura 63 - Foto do Sítio 2: área de solo batido por servir de caminho de passagem de pessoas e veículos.

A duração total da obtenção das projeções tomográficas em cada sítio foi de aproximadamente 2 horas e 30 minutos, desconsiderando o tempo de ajuste da eletrônica e da mesa posicionadora que levou cerca de 10 minutos. A bateria utilizada de 45 Ah proporcionou uma autonomia nas medidas de aproximadamente 3 horas e 30 minutos, tendo sido necessária uma bateria adicional de mesma amperagem para a segunda medida. O *software* de automação e controle da mesa posicionadora possui em seu painel virtual um LED indicador de carga baixa da bateria. Tal controle é realizado pelo circuito eletrônico ilustrado pela Figura 25.

Os resultados da amostragem de Latossolo Roxo em campo estão apresentados através de imagens tomográficas que ilustram a variação espacial em densidade em dois formatos diferentes: (i) em escala de cinza e (ii) em PseudoColor (Figuras 64 e 65).

Através das imagens tomográficas, foi possível visualizar as variações espaciais na densidade do Latossolo Roxo nos dois diferentes sítios. Analisando-se ambas as imagens, foi possível observar que na imagem da Figura 64 as variações possuem tons mais claros em relação às variações da Figura 65. Tons mais claros, sejam estes em Pseudocolor ou em escala de cinza, traduzem uma menor densidade, ou seja, a região amostrada do primeiro sítio analisado (Sítio 1) apresentou uma menor densidade em relação à região do sítio 2. Tal comportamento era previsto e desejado, uma vez que visualmente o solo do sítio 2, por servir de caminho à pessoas e veículos, não possuía cobertura vegetal e sua superfície apresentava certa rigidez superficial.

As imagens obtidas são representações matemáticas da quantidade de fótons espalhados pelo efeito Compton, pois são obtidas através do algoritmo de retroprojeção filtrada. Tais fótons espalhados traduzem fisicamente a densidade do solo, pois têm proporcionalidade direta com a densidade eletrônica, que por sua vez, é diretamente proporcional à densidade física do meio (Equação 5).

As imagens possuem o formato retangular devido à resolução centimétrica do tomógrafo e os quatro pontos que aparecem fora do formato quadricular da área amostrada se devem à um efeito comum em imagens tomográficas denominado de artefato. Nesse caso, a ocorrência dos artefatos pode ter sido pela baixa energia dos fótons espalhados.

O aumento da resolução tomográfica faria com que o formato quadrangular tendesse ao formato circular e real da região amostrada (Figura 39).

Figura 64 - Imagem tomográfica Compton do Sítio 1 em função da densidade em: (a) PseudoColor e (b) escala de cinza

Figura 65 - Imagem tomográfica Compton do Sítio 2 em função da densidade em: (a) PseudoColor e (b) escala de cinza.

Através da análise das imagens tomográficas, foi possível observar a variação espacial da densidade do Latossolo Roxo em um plano longitudinal e superficial do solo com uma área de 25 cm² e de 5 centímetros de profundidade.

Estudos da variação espacial densitométrica, na região superficial do solo, permite diagnosticar e estudar problemas relacionados com a infiltração da água no solo e com o dificultamento de germinação de uma determinada cultura. Dentre as condições físicas de superfície do solo que afetam a infiltração de água da chuva, se destacam a presença de selamento e, ou, de crostamento e de rugosidade superficial ou micro-relevo. O selamento superficial do solo ocorre devido à ação de impacto das gotas da chuva diretamente sobre o solo sem vegetação ou devido a velocidade e tamanhos das gotas de água de um sistema de irrigação. O impacto das gotas de água no solo faz com que o particulado do solo seja desagregado, obstruindo os poros e levando ao selamento da superfície. Tal ocorrência pode levar a diminuição da taxa de infiltração de água no solo e ao aumento da quantidade de enxurrada, provocando erosão hídrica. Tal erosão contribui para a contaminação de lagos e rios devido ao excesso de carregamento de matéria orgânica.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos resultados e argumentações apresentadas, a presente tese representa uma importante contribuição dentro do contexto das pesquisas nas áreas de física computacional e nuclear, instrumentação eletrônica e automação, aplicadas aos estudos relacionados à Física de Solos e no desenvolvimento de novas tecnologias voltadas à instrumentação agropecuária.

A modelagem computacional foi de grande valia nos estudos sobre o efeito Compton. Através da variação dos parâmetros de entrada analisados, tais como o fluxo e a energia dos fótons incidentes, foi possível compreender melhor o peso que tais variáveis possuem na quantidade de fótons detectados. As saídas gráficas produzidas permitiram não somente uma análise quantitativa, mas qualitativa do fenômeno físico, permitindo a visualização do perfil comportamental da variação de cada parâmetro analisado.

O *software* de interface, dedicado à automação e controle da mesa de posicionamento e desenvolvido no ambiente de programação LabVIEW PC, possibilitou a implementação do algoritmo da rotina experimental, visualização do *status* da medida, indicação de carga baixa da bateria de 12V, a geração de arquivo com identificação e dados das medidas e a possibilidade de movimentação da sonda de maneira manual.

Os circuitos eletrônicos desenvolvidos para a automação e controle em conjunto com o módulo de aquisição de dados (DAQ USB-6008) da empresa National[®], mostraram-se confiáveis durante as medidas, não apresentando superaquecimento, queima de componentes eletrônicos ou outros problemas que pudessem comprometer o funcionamento do sistema. Os sensores de início e final de curso foram de grande utilidade para o correto posicionamento da sonda.

Os resultados alcançados através das imagens tomográficas Compton são semi-quantitativos, indicando a morfologia da distribuição espacial dos pixels, bem como a ordem de grandeza da densidade do solo observado. Assim sendo, se faz necessário complementar as etapas de calibração para as medidas de densidade de solos para que o tomógrafo Compton possa ter seu uso na agricultura.

As contribuições originais desta tese foram: (i) o desenvolvimento e construção de um tomógrafo Compton para o uso em campo com avançada

tecnologia de detecção e (ii) a obtenção de imagens tomográficas para a análise da densidade de solos agrícolas sem coleta de amostras, conservando as condições naturais do solo, bem como sem a necessidade de degradar o ambiente amostrado.

Propostas de trabalhos futuros:

- Finalizar a automação do tomógrafo através da implementação da comunicação com o sistema de aquisição de dados do detector, possibilitando que o acionamento, os ajustes dos parâmetros experimentais e organização dos dados sejam realizados somente através do *software* de automação e controle (LabVIEW);
- Miniaturizar o sistema mecânico de posicionamento, otimizando a portabilidade do tomógrafo.

REFERÊNCIAS

- 1 GONÇALVES, W. G.; JIMENEZ, R. L.; ARAUJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; PIRES, F. R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p.67-75, jan./abr., 2006.
- 2 RADON, J. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten. **Proceedings...** Royal Saxonian Academy of Sciences at Leipzig, Mathematical and Physical Section, v. 69, p. 262–277, 1917.
- 3 CORMACK, A. M. Representation of a foundation by Its Line with some radiological application. **Journal of Applied Physics**, v. 34, n. 9, p. 2722-2727, 1963.
- 4 HOUNSFIELD, G. N. Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. description of system. **British Journal of Radiology**, v. 46, p. 1016-1022, 1973. doi: 10.1259/0007.1285.46.552.1016.
- 5 SHERMAN, I. S.; STRAUSS, M. G.; BRENNER, R. Compton scatter in germanium and its effect on imaging with gamma-ray position-sensitive detectors. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. NS-25, n. 1, p. 665-675, 1978.
- 6 SINGH, M.; DORIA, D. An electronically collimated gamma camera for single photon emission computed tomography. Part II: image reconstruction and preliminary experimental measurements. **Medical Physics**, v. 10, n.4, p. 428-435, 1983.
- 7 SINGH, M. An electronically collimated gamma camera for single photon emission computed tomography. part I: theoretical considerations and design criteria. **Medical Physics**, v. 10, n. 4, p. 421-427, 1983.
- 8 HANSON, A. L.; GIGANTE, G. E.; MERON, M. Contours of constant scattering angle. **Physical Review Letters**, v. 61, n. 2, p. 135-137, 1988.
- 9 HANSON, A. L.; GIGANTE, G. E. Evaluation of geometrical contributions to the spread of the Compton-scatter energy distribution. **Physical Review A**, v. 40, n. 1, p. 171-180, 1989.

10 CESAREO, R.; HANSON, A. L.; GIGANTE, G. E.; PEDRAZA, L. J.; MAHTABOALLY, S. Q. G. Interaction of keV photons with matter and new applications. **Physics Reports**, v. 213, n. 3, p. 117-178, 1992.

11 PRETTYMAN, T. H.; GARDNER, R. P.; RUSS, J. C.; VERGHESE, K.; A combined transmission and scattering tomographic approach to composition and density imaging. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 44, n.10/11, p. 1327-1341, 1993.

12 BALOGUN, F. A.; SPYROU, N. M. Compton scattering tomography in the study of a dense inclusion in a lighter matrix. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 83, n. 4, p. 533-538, 1993.

13 NORTON, S. J. Compton scattering tomography. **Journal of Applied Physics**, v. 76, n. 4, p. 2007-2015, 1994.

14 ARENDTSZ, N. V.; HUSSEIN, E. M. A. Energy-spectral Compton scatter imaging – part I: theory and mathematics. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 42, n. 6, p. 2155-2165, 1995.

15 ZHU, P.; DUVAUCHELLE, P.; PEIX, G.; BABOT, D. X-ray Compton backscattering techniques for process tomography: imaging and characterization of materials. **Measurement Science and Technology**, v. 7, n. 3, p. 281-286, 1996.

16 HARDING, G. Inelastic photon scattering: effects and applications in biomedical science and industry. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 50, n. 1, p. 91-111, 1997.

17 BALOGUN, F. A. Angular variation of scattering volume and its implications for Compton scattering tomography. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 50, n. 2, p. 317-323, 1999.

18 BALOGUN, F. A.; BRUNETTI, A.; CESAREO, R. Volume of intersection of two cones. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 59, n. 1, p. 23-30, 2000.

19 CRUVINEL, P. E.; BALOGUN, F. A. Minitomography scanner for agriculture based on dual-energy Compton scattering. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING-SIBGRAPI, 13, 2000, Gramado. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2000. p. 193-199.

20 CESAREO, R.; BALOGUN, F.; BRUNETTI, A.; BORLINO, C. C. 90° Compton and Rayleigh measurements and imaging. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 61, n. 3-6, p. 339-342, 2001.

21 CESAREO, R.; BORLINO, C. C.; BRUNETTI, A.; GOLOSIO, B.; CASTELLANO, A. A simple scanner for Compton tomography. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 487, n. 1-2, p. 188-192, 2002.

22 BALOGUN, F. A.; CRUVINEL, P. E. Compton scattering tomography in soil compaction study. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A**, v. 505, n. 1-2, p. 502-507, 2003.

23 ROY, S. C.; PRATT, R. H. Need for further inelastic scattering measurements at X-ray energies. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 69, p. 193-197, 2004. doi:10.1016/S0969-806X(03)00465-1.

24 SÖĞÜT, Ö.; KÜÇÜKÖNDER, A.; BÜYÜKKASAP, E. Dependence on average atomic number of coherent/incoherent scattering intensity ratios in compounds. **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, v. 87, n. 1, p.15-23, 2004.

25 RAO, D. V.; SELTZER, S. M.; BERGSTROM JR, P. M. Compton scattering cross-sections for individual subshells for a few elements of biological interest in the energy region 5 keV – 10MeV. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 70, n. 4-5, p. 479-489, 2004.

26 ÇONKA-NURDAN, T.; NURDAN, K.; WALENTA, A. H.; CHIOSA, I.; FREISLEBEN, B.; PAVEL, N. A.; STRÜDER, L. First results on Compton camera coincidences with the silicon drift detector. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 52, n. 5, p. 1381-1385, Oct. 2005.

27 CRUVINEL, P. E.; BALOGUN, F. A. Compton scattering tomography for agricultural measurements. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 151-160, 2006.

28 PAŠIĆ, S.; ILAKOVAC, K. Measurement of Compton scattering on bound electrons by the coincidence method. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 75, n. 11, p. 1683-1687, 2006.

29 DONATIVI, M.; QUARTA, S.; CESAREO, R.; CASTELLANO, A. Rayleigh to Compton ratio with monochromatic radiation from an X-ray tube (preliminary results). **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 264, n. 1, p. 189-193, 2007.

30 SEO, H.; AN, S. H.; KIM, J. K.; KIM, C. H. Monte Carlo study of a double-scattering Compton camera with GEANT4. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 580, n. 1, p. 314-317, 2007.

31 SEO, H.; LEE, S. H.; KIM, C. H.; AN, S. H.; LEE, J. H.; LEE, C. S. Optimal geometrical configuration of a double-scattering Compton camera for maximum imaging resolution and sensitivity. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 591, n. 1, p. 80-83, 2008.

32 YAO, W.; LESZCZYNSKI, K. An analytical approach to estimating the first order x-ray scatter in heterogeneous medium. **Medical Physics**, v. 36, n. 7, p. 3145-3156, 2009.

33 HARTEMANN, F. V. Compton scattering overview. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 608, p. S1-S6, 2009. doi: 10.1016/j.nima.2009.05.167.

34 PRATT, R. H.; LAJOHN, L. A.; FLORESCU, V.; SURIC, T.; CHATTERJEE, B. K.; ROY, S. C. Compton scattering revisited. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 79, p. 124-131, 2010. doi:10.1016/j.radphyschem.2009.04.035.

35 PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: a literature review of the Brazilian contribution. **Soil & Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010.

36 ŞAHİN, Y.; ÜN, A.; DEMİR, D.; ÖZGÜL, M.; FIDAN, M. Measurement of soil water using Compton scattering. **X-Ray Spectrometry**, v. 40, n. 4, p. 315-318, 2011.

37 CRUVINEL, P. E. ; SCANNAVINO JUNIOR., F. A. Evolução de um instrumento para avaliação da compactação de solos agrícolas com espalhamento Compton. In SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A. (Ed.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 40, 2011, Cuiabá-MT. **Anais...** Cuiaba, 2011. n. TR0713, 2011. ISBN: 978-85-64681-00-2. 1 CD-ROM.

38 HARKNESS, L. J.; ARCE, P.; JUDSON, D. S.; BOSTON, H. C.; CRESSWELL, J. R.; DORMAND, J.; JONES, M.; NOLAN, P. J.; SAMPSON, J. A.; SCRAGGS, D. P.; SWEENEY, A.; LAZARUS, I.; SIMPSON, J.; A Compton camera application for the GAMOS GEANT4-based framework. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 671, n. 11, p. 29-39, 2012.

39 SCANNAVINO JUNIOR., F. A.; CRUVINEL, P. E. A graphical tool for an analytical approach of scattering photons by the Compton effect. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 674, n. 11, p. 28-38, 2012.

40 RIGAUD, G.; NGUYEN, M. K.; LOUIS, A. K. Modeling and simulation results on a new Compton scattering tomography modality. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 33, p. 28-44, 2013. doi: 10.1016/j.simpat.2012.03.007.

41 US DEPARTMENT OF COMMERCE (United State of America). Stephen J. Norton. **Compton scattering tomography**. US 5430787, 4 July 1995.

42 HERTZ, H. Üeber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electrische Entladung (The influence of ultraviolet light on the electric discharge). **Annalen der Physik**, v. 31, n. 8, p. 983, 1887.

43 EINSTEIN, A. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen gesichtspunkt (The generation and transformation of light by heuristic aspect). **Annalen der Physik**, v. 17, n. 6, p. 891-921, 1905.

44 COMPTON, A. H. A quantum theory of the scattering of X-rays by lights elements. **Physical Review**, v. 21, n. 5, p. 483-502, 1923.

45 RAYLEIGH, L. On the transmission of light through an atmosphere containing small particles in suspension, and on the origin of the blue of the sky. **Philosophical Magazine**, v. 47, n. 287, p. 375-384, 1899.

46 OPPENHEIMER, J. R.; PLESSET, M. S. On the production of the positive electron. **Physics Review**, v. 44, n. 1, p. 53-54, 1933.

47 CHADWICK, J.; GOLDBABER, M. A 'nuclear photo-effect': disintegration of the dipton by γ -rays. **Nature**, v. 134, p. 237-238, 1934.

48 BEISER, A. **Perspectivas da física moderna**. São Paulo: Polígono, 1967. 458p.

49 CHASE, G. D.; RABINOWITZ, J. L. **Principles of radioisotope methodology**. 3rd ed. Minneapolis: Burgess Publishing Co, 1968.

50 CHEN, S.; KOTLARCHYK, M. **Interaction of photons and neutrons with matter**. 2nd ed. New Jersey: World Scientific Publish Co., 2007. 441 p. ISBN 10 981-02-4214 X.

51 CAMARGO, O. A. de; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. 94 p. (Boletim técnico, 106).

52 PIRES, L. F. et al. Application of gamma ray computed tomography to analysis of soil structure before density evaluations. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 63, p. 505-511, 2005.

53 AMPTEK INC. **Complete X-ray spectrometer with silicon drift detector (SDD) – user guide operating instructions**. Disponível em: <<http://www.amptek.com/apnotes.html>>. Acesso em: 20 abr. 2013.

54 KAK, A. C. **Principles of computerized tomographic imaging**. New York: IEEE Press, 1987. (IEEE Engineering in Medicine and Biology Society).

55 COELHO, L. G.; BARTH, O. M.; CHAVES, H. A. F. Palynological records of environmental changes in Guaratiba mangrove area, southeast Brazil, in the last 6000 years B.P. **Revista Pesquisas em Geociências**, v.29, n. 1, p.71-79, 2002.

56 MODOLO, A. J.; FERNANDES, H. C.; NAIME, J. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SANTOS, N. T.; SILVEIRA, J. C. M. Avaliação do ambiente solo-semente por meio da tomografia computadorizada. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 525-532, 2008.

57 DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 703-709, 1999.

58 CHANTLER, C. T.; OLSEN, K.; DRAGOSSET, R. A.; CHANG, J.; KISHORE, A. R.; KOTOCHIGOVA, S. A.; ZUCKER, D. S. **Detailed tabulation of atomic form factors, photoelectric absorption and scattering cross section, and mass attenuation coefficients for Z = 1-92 from E = 1-10 eV to E = 0.4-1.0 MeV**. Physical Measurement Laboratory (NIST). Disponível em: <<http://physics.nist.gov/PhysRefData/FFast/html/form.html>> Acesso em: 14 jul. 2013.

APÊNDICES

APÊNDICE A - VISTA LATERAL DA MESA POSICIONADORA

APÊNDICE C - CIRCUITO ELETRÔNICO DA UNIDADE DE POTÊNCIA E CONVERSÃO DE SINAIS (UPC)