

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE AQUIDAUANA
CURSO DE MESTRADO EM GEOGRAFIA**

WANLY PEREIRA ARANTES

MAPEAMENTO DO PERIGO SÍSMICO NA BACIA SEDIMENTAR DO PANTANAL

**AQUIDAUANA – MS
2019**

WANLY PEREIRA ARANTES

MAPEAMENTO DO PERIGO SÍSMICO NA BACIA SEDIMENTAR DO PANTANAL

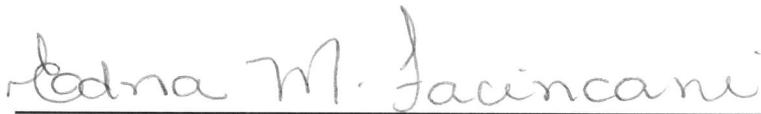
Dissertação apresentada como exigência do curso de Mestrado em Geografia, da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, sob a orientação da Prof^a. Dr^a. Edna Maria Facincani e co-orientação do Prof. Dr. Marcelo S. Assumpção (IAG/USP).

AQUIDAUANA – MS
2019

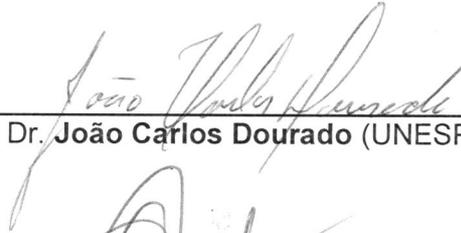
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: **Wanly Pereira Arantes**

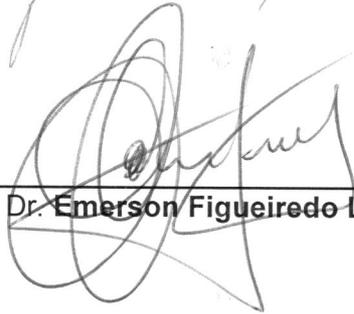
Dissertação defendida e aprovada em 29 de março de 2019 pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. **Edna Maria Facincani** (Orientadora)



Prof. Dr. **João Carlos Dourado** (UNESP)



Prof. Dr. **Emerson Figueiredo Leite** (CPAQ/UFMS)

RESUMO

O Brasil é um território considerado tectonicamente como intraplaca, e o Pantanal é uma bacia de idade quaternária e tectonicamente ativa. Este trabalho visa elaborar o Mapa de Perigo Sísmico da Bacia Sedimentar do Pantanal, representando geograficamente as acelerações sísmicas que podem ocorrer, parametrizadas por valores de excedência de probabilidade, período de retorno e frequência sísmica. Para execução do procedimento foram delineadas quatro fontes sismogênicas, contendo a distribuição espacial de eventos instrumentais e históricos inventariados no período de 1724 a 2018, que foi minuciada por uma metodologia de análise probabilística de perigo sísmico denominada Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). Mediante a aplicação da metodologia PSHA foi calculada uma concentração de valores mais altos de aceleração na região central do Pantanal, com alongamento longitudinal proeminente no sentido N-S, NE-SW, sobreposta à fonte sismogênica mais atuante em número e magnitude de eventos. Este agrupamento espacial pode estar relacionado com a gênese da bacia, com as expressões neotectônicas atuantes ou com os ciclos de grandes enchentes. As acelerações obtidas com probabilidade de 10% de excedência em 50 anos revelam regionalidades superiores às estipuladas na Norma Técnica Brasileira.

Palavras-chave: PSHA. Pantanal. Perigo sísmico.

ABSTRACT

Brazil is tectonically considered an intraplate territory and the Pantanal is a sedimentary basin of Quaternary age under neotectonic activities. This work aims the preparation of a Seismic Hazard Map for the Pantanal Sedimentary Basin, representing geographically the seismic accelerations that can occur, parameterized by values of probability exceedance, return period and seismic frequency. To perform the procedure, four seismic sources were delineated, containing the spatial distribution of instrumental and historical events, inventoried from 1724 to 2018, which were analysed by a probabilistic seismic hazard analysis methodology called Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). By applying the PSHA methodology, a concentration of higher acceleration values was calculated in the Pantanal central region, with prominent longitudinal stretching in the N-S direction, NE-SW, superimposed on the most active seismogenic source in number and magnitude of events. This spatial grouping can be related to the genesis of the basin, active neotectonic expressions or even with the great floods cycles. The accelerations obtained with 10% probability of exceedance in 50 years, reveal regionalities higher than those stipulated in the "Brazilian Technical Standard".

Keywords: PSHA. Pantanal. Seismic hazard.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estruturação da dissertação, indicando que a explanação dos conceitos básicos de sismologia, análise probabilística de perigo sísmico e sismicidade na bacia sedimentar do Pantanal são anteriores à metodologia pois portam conceitos necessários ao entendimento do tema.....	16
Figura 2- Sismicidade mundial, com distribuição de terremotos de magnitude maior do que 5, onde se observa a concentração de eventos nas bordas de placas. Os sismos maiores são os mais profundos e os de tonalidade quente são os de maior magnitude. O Brasil está centralizado na placa Sul-Americana, em calmaria sísmica.....	19
Figura 3- a) Ondas P (longitudinais): o material dilata e contrai no sentido do deslocamento da onda. b) Ondas S (transversais): o material se deforma e se amolda no sentido transversal ao deslocamento da onda.....	20
Figura 4- Tipos de ondas quanto à direção de propagação em similaridade com uma onda em corda e em mola.....	20
Figura 5- Ondas de superfície Rayleigh e Love. “Y” é a direção radial, ou direção de propagação da onda. “X” é a direção transversal, ou direção horizontal perpendicular à propagação. A oscilação da partícula na onda Rayleigh acontece nos eixos “X” e “Z” sendo uma elipse retrógrada no plano vertical radial. A vibração da partícula na onda Love é na direção “X”.....	21
Figura 6- Registro típico de um sismo realçando os tempo de chegada de uma onda P, onda S, o intervalo de tempo entre elas e a chegada posterior de uma onda Love. Na onda S é destacada a medida de sua amplitude, parâmetro para alguns cálculos de magnitude.....	24
Figura 7- Curva de atenuação de aceleração, mostrando dois pontos A e B e as PGAs resultantes, a primeira abaixo da média e a segunda acima da média, conforme o espalhamento normal dos valores.....	25
Figura 8- Janela do software CRISIS mostrando uma distribuição de probabilidade de excedência de aceleração sísmica de 2% com tempo de utilização de 50 anos, aonde na região vermelha o valor de 3000 cm/s ² tem 2% de probabilidade de ser excedido a cada 50 anos, indicando as cores quentes como indicadoras de maiores acelerações.....	28
Figura 9- Janela do software R-CRISIS mostrando uma curva de perigo sísmico à esquerda e a curva de resposta espectral à direita para um ponto determinado por coordenadas. No gráfico à esquerda observa-se que as probabilidades são maiores para as pequenas acelerações. No gráfico à direita verifica-se um máximo no eixo das acelerações no período de 0.1s ou 10hz, que é a frequência da maior aceleração no local, para aquela condição de tempo de utilização. A resposta espectral uma estrutura deve ser díspar ou inferior ao espectro de resposta do local para não haver ressonância.....	29
Figura 10- Utilização da curva de perigo sísmico e de resposta espectral.....	29
Figura 11- Espalhamento vertical, ou na ordenada do parâmetro PGA, dada uma distância..	34
Figura 12- Fluxograma da metodologia e aplicação do PSHA, onde em verde está a introdução dos dados geográficos, geológicos e sísmicos, em amarelo estão os processos e em rosa os resultados. As figuras são ilustrativas das etapas.....	38
Figura 13- Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil, pela Norma Brasileira NBR 15421, para terrenos classe B(“Rocha”). Novamente observa-se a generalidade na distribuição das acelerações de projeto, não contemplando as irregularidades regionais e adotando uma extensão de medidas acanhadas para as singularidades regionais..	39

Figura 14- GSHAP Global Seismic Hazard Assessment Program, onde se observa ser o Brasil considerado uma área com sismicidade muito fraca.....	39
Figura 15- A: Localização do Pantanal na América do Sul B: caracterização da geologia (imagem proveniente de Assine et al 2015) e C: perfil topográfico do retângulo envolvente mostrando a depressão central. Relevo e perfil elaborados com dados do modelo digital de elevação proveniente do U.S. Geological Survey com precisão de 30' (Center for Earth Resources Observation and Science).....	41
Figura 16- Boletim Sísmico Brasileiro (1720-2015/12), com detalhamento da área de estudo e adjacências representado pelo retângulo, e representação da distribuição dos epicentros dos sismos brasileiros.....	43
Figura 17: Mapa de Áreas Sismogênicas do Brasil segundo o geólogo norte-americano Branner em 1912.....	45
Figura 18: Espessura crustal do Brasil, ressaltando, em vermelho, a região do Pantanal. Círculos cinzentos indicam espessura normal entre 36.5 e 41.5 km, vermelhos anunciam espessura de crosta maior do que 41.5 km e círculos azuis denotam espessuras crustais inferiores a 31.5 km. Observa-se que o Pantanal está apresentando espessura entre 31.5 e 36.5.	45
Figura 19: Distribuição temporal dos sismos no Pantanal onde são lançados os eventos por magnitude e por data. Observa-se um paulatino incremento na quantidade de registros, concomitante com o aumento da completude de sismos de baixa magnitude devido ao crescimento da população e à densificação da implantação de estações sismográficas modernas e mais sensíveis pela Rede Sismográfica Brasileira.....	46
Figura 20: Bloco esquemático ilustrando a geometria da bacia sedimentar do Pantanal. O megafan do Taquari é considerado o maior do planeta.....	46
Figura 21: Logical Tree ou Árvore Lógica de composição equivalente dos modelos de atenuação de Toro(1997) e de Pezeshk(2018).....	50
Figura 22-Distribuição espacial de sismos consoante Apêndice 01.....	53
Figura 23-Representação das fontes sísmicas e respectivas distribuições individuais de sismos	54
Figura 24-Mapa de perigo sísmico segundo modelo de Pezeshk.....	55
Figura 25-Mapa de perigo sísmico segundo modelo de Toro.....	56
Figura 26-Mapa de perigo sísmico segundo modelo composto pela Árvore Lógica Pezeshk e Toro.....	57
Figura 27-Curvas espectrais para as localidades de Barão de Melgaço, Cuiabá, Aquidauana e o ponto genérico Central, representados por cores distintas, segundo os modelos de atenuação de Pezeshk(topo), Toro(meio) e sua composição equipolente pela Árvore Lógica.....	60
Figura 28-Curvas de perigo sísmico para as cidades de Barão de Melgaço, Cuiabá, Aquidauana e ponto genérico Central, representados em cores distintas, nos modelos de Pezeshk(topo), Toro(meio) e composição equipolente de ambos pela Árvore Lógica.....	61
Figura 29-Mapa de Perigo Sísmico da Bacia Sedimentar do Pantanal segundo Árvore Lógica composta pelos modelos de atenuação de Pezeshk e de Toro em equivalência.....	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Escala de Intensidade Mercalli Modificada (abreviada). A Escala Mercalli original de 1902 foi alterada em 1931 por A. Neumann com modificação nas descrições dos efeitos característicos de cada grau da escala e foi finalmente, em 1956, batizada de Escala Mercalli Modificada, comumente abreviada por “MM”, pelo sismólogo Charles Richter após a introdução de alterações nos graus de intensidade.....	23
Tabela 2-Perigo sísmico nas cidades pantaneiras e peri pantaneiras com respectiva população.	64
Tabela 3-Sismos utilizados neste trabalho.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS

BRASIS	Rede Sismográfica Integrada do Brasil
BSB	Boletim Sísmico Brasileiro
BSP	Bacia Sedimentar do Pantanal
CSB	Catálogo Sísmico Brasileiro
GMP	Ground Motion Prediction
GME	Ground Motion Equation
IAG	Instituto de Astronomia e Geofísica
PGA	Peak Ground Acceleration
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Assessment
RSBR	Rede Sismográfica Brasileira
RSCN	Rede Sismográfica do Centro e Norte do Brasil
UFMS	Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Apresentação.....	14
1.2 Estrutura Do Trabalho.....	16
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE SISMOLOGIA E MAPEAMENTO DE PERIGO SÍSMICO.....	17
3.1 O Que É Um Terremoto?.....	17
3.2 Ondas Sísmicas.....	18
3.2.1 Ondas De Corpo.....	19
3.2.2 Ondas Superficiais.....	20
3.3 Medindo Os Terremotos – Intensidade Mercalli.....	21
3.4 Medindo Os Terremotos – Escala De Magnitudes Richter.....	22
3.5 Equações De Atenuação Sísmica.....	24
3.6 O Que É Perigo Sísmico.....	26
3.6.1 Perigo Sísmico (Seismic Hazard).....	26
3.6.2 Risco Sísmico.....	26
3.7 Mapeamento Do Perigo Sísmico.....	27
3.7.1 Curva De Excedência De Probabilidade Ou Curva De Perigo Sísmico.....	27
3.7.2 Curva De Aceleração Espectral.....	28
3.8 Importância Da Mensuração Da Perigo Sísmico.....	30
3.9 Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA).....	30
3.9.1 Sequência Da Aplicação Da Metodologia De Cornell, Ou PSHA.....	31
3.9.1.1 Coleta De Dados.....	31
3.9.1.2 Identificação Das Fontes Sismogênicas.....	31
3.9.1.3 Identificação Da Recorrência De Magnitudes.....	32
3.9.1.4 Modelação Das Distâncias Da Fonte Sismogênica Ao Sítio De Interesse.....	33
3.9.1.5 Estabelecimento De Um Modelo De Predição De Aceleração Sísmica.....	33

3.9.1.6 <i>Fórmula Final Do PSHA</i>	35
3.10 Fluxograma Do Procedimento PSHA	36
3.11 Norma Técnica Brasileira	37
4 SISMICIDADE NA BACIA SEDIMENTAR DO PANTANAL	40
4.1 Sismicidade Global.....	40
4.2 Sismicidade No Brasil.....	41
4.3 Sismicidade Na Bacia Sedimentar Do Pantanal.....	42
5 METODOLOGIA	46
5.1 Definição Da Área De Estudo.....	47
5.1.1 <i>Área De Responsabilidade</i>	47
5.1.2 <i>Área De Influência</i>	47
5.2 Fontes De Informação Bibliográfica.....	47
5.3 Fontes De Dados Sísmicos.....	47
5.4 Tecnologia Utilizada.....	48
5.4.1 <i>R-CRISIS 2018</i>	48
5.4.2 <i>QGIS (Quantum GIS, Open Source Geographic Information System)</i>	48
5.4.3 <i>Weichert Script Linux</i>	48
5.4.4 <i>Suíte Libre Office</i>	48
5.5 Elaboração Do PSHA.....	48
5.5.1 <i>Escolha Das Fontes Sísmicas</i>	49
5.5.2 <i>Dedução Dos Parâmetros Dos Modelos De Recorrência</i>	49
5.5.3 <i>Seleção Das Equações De Atenuação</i>	49
5.5.4 <i>Processamento Dos Valores E Mapas De Perigo Sísmico</i>	50
5.5.5 <i>Mapas De Perigo Sísmico</i>	50
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
6.1 Mapeamento Do Perigo Sísmico Na Bacia Sedimentar Do Pantanal.....	51
6.1.1 <i>Mapa Da Distribuição Espacial De Todos Os Sismos</i>	52
6.1.2 <i>Mapa Das Fontes Sísmicas</i>	52
6.1.3 <i>Mapas De Perigo Sísmico Da BSP</i>	52
6.2 Curvas De Perigo Sísmico E Curvas Espectrais.....	58
6.2.1 <i>Curvas Espectrais</i>	58
6.2.2 <i>Curvas De Perigo Sísmico</i>	59

6.3 Mapa De Perigo Sísmico Da Bacia Sedimentar Do Pantanal.....	59
7 CONCLUSÕES.....	63
7.1 Mapa De Perigo Sísmico.....	63
7.2 Curvas De Perigo Sísmico E Curvas Espectrais.....	64
7.3 Contribuição Para A Norma Brasileira ABNT NBR-15421.....	65
7.4 Considerações Finais.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Historicamente, o Pantanal é considerado uma das regiões sísmicas do Brasil (BRANNER, 1912), sendo caracterizado por uma bacia sedimentar de idade quaternária, denominada Bacia Sedimentar do Pantanal(BSP), tectonicamente ativa, componente da Bacia do Alto Paraguai, Região Centro-Oeste do Brasil, sendo considerada a maior bacia alagada contínua do mundo com 140.000 km² em território brasileiro, distribuídos nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Aureolada por formações cristalinas pré-cambrianas e disposições sedimentares de idades pré-cambrianas, paleozoicas e mesozoicas respectivamente, apresenta baixo gradiente topográfico com lento escoamento de sua drenagem, causa das enchentes sazonais nos meses de verão e outono(ASSINE 2003). Sua paisagem se caracteriza pelos megaleques aluvionais com deposição sedimentar ativa e seu tectonismo é manifestado por lineamentos estruturais particularizados em lagoas permanentes e em escoamento, alinhadas à direção SW-NE ou SE-NW(OLIVEIRA *et al.* 2008).

A sismicidade do Centro-Oeste Brasileiro e do Pantanal vem sendo estudada a partir de projetos de pesquisa desenvolvidos pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), pertencente à Universidade de São Paulo (USP), em cooperação com a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). A região apresenta áreas com atividade sísmica mais frequente, tais como a Faixa Sísmica Goiás-Tocantins e a Bacia Sedimentar do Pantanal. Os projetos de pesquisa coordenados pelo Prof. Dr. Marcelo Sousa Assumpção (IAG/USP) foram: “Tomografia Sísmica do Brasil”, “Estudo de Possíveis Grabens no norte da Bacia do Paraná”, “Rede Sismográfica Integrada do Brasil (BRASIS)” e “Pantanal-Chaco-Paraná Basins (PCPB): *Crust and Upper Mantle Seismic Structure and Evolution*”. Subordinados a estes, projetos secundários foram coordenados pela Prof^a. Edna Maria Facincani (UFMS), tais como: “Sismicidade da Região de Aquidauana – MS”, “Sismicidade da Bacia Sedimentar do Pantanal, com telessísmica”, “Monitoramento Sísmico da Bacia Sedimentar do Pantanal e Adjacências” e a presente dissertação de Mestrado intitulada “Mapeamento de Perigo Sísmico da Bacia Sedimentar do Pantanal ”.

O Mapeamento de Perigo Sísmico realizado neste trabalho é fundamentado na metodologia desenvolvida pelo engenheiro civil Allan Cornell, em 1968, denominada PSHA ou Probabilistic Seismic Hazard Analysis, traduzido como Análise Probabilística de Perigo Sísmico, que consiste na elaboração de um mapa temático com a distribuição geográfica dos valores máximos de aceleração,

velocidade ou deslocamento superficial devido à ação sísmica, que tem uma probabilidade estipulada de ser excedida ou não atingida num determinado intervalo de tempo denominado tempo de utilização. Usualmente é utilizada a aceleração como parâmetro, por ser o indicador adotado nas Normas Técnicas referentes ao assunto. A partir dos resultados do mapeamento de perigo sísmico, é possível conceber um gráfico de diversas curvas de perigo sísmico para um ponto da região mapeada, assim como o gráfico da resposta espectral, que representa, em cada local, a variação da intensidade das ações como resultado da variação do período de oscilação da onda sísmica, revelando como será a resposta dinâmica de um objeto aí localizado, em função de suas frequências naturais.

Frequência natural ou de ressonância é a frequência da ação sísmica que se sobrepõe construtivamente à frequência da reação do objeto exposto à ação sísmica, gerando amplitudes maximizadas e potencialmente perigosas no caso de edificações.

O mapeamento do perigo sísmico apresentado na presente dissertação é estribado em dados instrumentais colhidos a partir das instalações de estações sismográficas no Estado de Mato Grosso do Sul, através da **Rede Sismográfica Brasileira(RSBR)**, que tem como objetivo “monitorar a sismicidade do território nacional e gerar informações que suportem a investigação da estrutura interna da terra através da implantação e manutenção de estações sismográficas permanentes” (<http://rsbr.gov.br/projeto.html>), da qual faz parte a **Rede Sismográfica do Centro e Norte do Brasil – RSCN**, sob coordenação da Universidade de Brasília (UNB) e a **Rede Sismográfica Integrada do Brasil – BRASIS**, sob a coordenação do Centro de Sismologia da Universidade de São Paulo (USP), responsável pela aquisição, curadoria e disseminação dos dados coletados pelas estações sismográficas de código BL(USP) e BR(UNB) disponibilizando seu acesso público através do **Boletim Sísmico Brasileiro e do Catálogo Sísmico Brasileiro**. Os sismos inéditos foram colhidos a partir da dissertação sobre sismos históricos no Centro-Oeste de Silva (2017).

1.2 Estrutura Do Trabalho

A estrutura do trabalho procura apresentar os itens de forma didática, para que o leitor, mesmo desabedor do tema ou que não tenha formação técnica, possa compreender e apreender o conteúdo da dissertação. O Fluxograma está proposto na Figura 1.

Figura 1- Estruturação da dissertação, indicando que a explanação dos conceitos básicos de sismologia, análise probabilística de perigo sísmico e sismicidade na bacia sedimentar do Pantanal são anteriores à metodologia pois portam conceitos necessários ao entendimento do tema



Fonte: a própria autora

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Mapear o Perigo Sísmico na Bacia Sedimentar do Pantanal conforme definição probabilística de Perigo Sísmico.

2.2 Objetivos Específicos

- Utilizar a metodologia probabilística de Cornell de análise sísmica: Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), para calcular e representar em mapa temático a probabilidade de excedência (10%) das acelerações de pico no solo, oriundas da atividade sísmica no Pantanal e entorno, denominadas PGA (Peak Ground Acceleration), para um determinado período (50 anos).
- Determinar e representar graficamente as curvas de perigo sísmico e de resposta espectral de três cidades e de um ponto genérico no Pantanal.
- Contribuir para o aprimoramento da Norma Brasileira(NBR) ABNT NBR-15421 Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos - Procedimentos, editada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ajustando valores de acelerações máximas na região do Pantanal.

3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE SISMOLOGIA E MAPEAMENTO DE PERIGO SÍSMICO

3.1 O Que É Um Terremoto?

Conforme Assumpção e Dias Neto (2000), terremoto, ou sismo, é a ruptura ou escorregamento relativo repentino de uma falha ou fratura geológica gerando vibrações instantâneas que se propagam volumetricamente, segundo o modelo do **Ressalto Elástico** proposto por Reid em 1911. A ruptura ocorre quando os esforços atuantes ultrapassam a capacidade de deformação e escoamento da rocha, havendo súbita descontinuidade mecânica e subsequentes reacomodações elásticas oscilantes, que dão a origem a uma onda oscilatória tridimensional amortecida, replicando as características iniciais de vibração, ou seja, mesma amplitude e mesmo período ou frequência. O campo de tensões tectônico atuante é desoprimido e reorganizado para as novas configurações geométricas da rocha. Um campo de tensões tectônicas é um campo de forças de origem tectônica, essencialmente gerado pelo movimento das placas tectônicas. Porém, pode ser resultante do acúmulo rápido ou lento de corpos massivos como nas enchentes ou nos deslizamentos naturais, induzido pela ação humana na implantação de grandes edificações, na implantação e preenchimento de barragens de contenção de água ou de despejo de rejeitos do processamento de minérios, ou nas tecnologias de extração de combustível fóssil por fraturamento hidráulico ou mesmo por perfuração simples, que são engenharias de desestabilização e desagregação.

Quanto maiores a área da superfície de ruptura e o deslocamento da região de ruptura, maior será a magnitude do sismo e maior a energia liberada, a qual será transportada pela onda sísmica amortecida, em parte transformada em calor e em parte impactando o espaço de percurso, com

intensidade que depende da magnitude do terremoto, da distância do epicentro, do caminho percorrido e das características do local impactado, sendo o ponto inicial da ruptura chamado de **foco** ou **hipocentro** e sua projeção na superfície chamada de **epicentro**.

A maior porção da energia sísmica mundial é liberada em sismos nas bordas das placas tectônicas por colisão, afastamento ou transcorrência entre elas, porém nas regiões distantes das bordas, chamadas intraplacas, também ocorrem terremotos em menor quantidade, de menor magnitude e com hipocentros mais rasos, conforme já mencionado no caso do Brasil, da ordem de 40 km que é a espessura média da crosta nos continentes. A atividade sísmica intraplaca mesmo sendo de baixa magnitude e em pouca quantidade não deve ser negligenciada, pois pode, eventualmente, produzir tremores com alta periculosidade para a população e seu patrimônio, com grande potencial transformante da paisagem. A Figura 2 ilustra a sismicidade mundial, amostrando sismos de magnitude maior do que 6, em sua maior parte distribuídos nas bordas das placas tectônicas, e o Brasil no interior da Placa Sul-Americana, desprovido de grandes eventos.

3.2 Ondas Sísmicas

São vibrações ou oscilações que se propagam pelo solo em todas as direções, a partir do foco, ou hipocentro, causadas pela ruptura das rochas. São caracterizadas por sua amplitude e pelo seu período ou por sua frequência. Frequência é uma grandeza relacionada ao período pela equação (1):

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Onde:

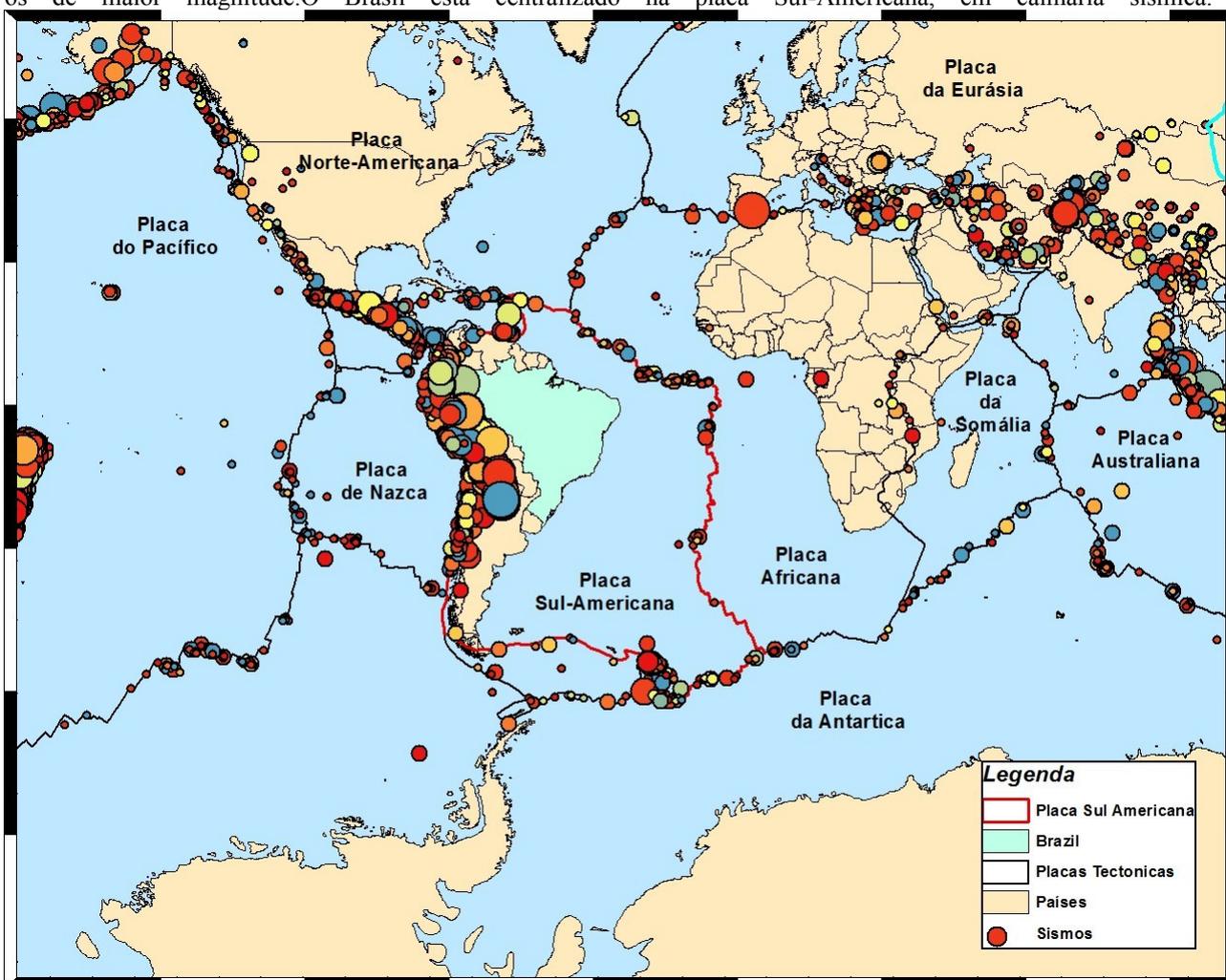
f é a frequência em Hertz(hz) que significa número de oscilações por unidade de tempo

T é o período em Segundos(s) que significa o tempo gasto numa oscilação

Serão utilizadas tanto a frequência como o período para caracterizar uma onda.

A amplitude da onda de propagação é proporcional à energia liberada na ruptura, que varia com a dimensão da área de ruptura e com o deslocamento relativo das partes rompidas. As ondas sísmicas são ondas elásticas que ao se propagarem no meio rochoso causam somente deformações elásticas ou transitórias no meio (variação de volume/ou de forma).

Figura 2- Sismicidade mundial, com distribuição de terremotos de magnitude maior do que 5, onde se observa a concentração de eventos nas bordas de placas. Os sismos maiores são os mais profundos e os de tonalidade quente são os de maior magnitude. O Brasil está centralizado na placa Sul-Americana, em calmaria sísmica.



Fonte: Imagem gerada segundo dados do ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue, com registros de 1904 a 2014 (<http://www.isc.ac.uk/iscgem/>), pela própria autora.

3.2.1 Ondas De Corpo

Existem dois tipos fundamentais de ondas: **longitudinais** (ou primárias, **ondas P**, pressure ou ondas de pressão) e **transversais** (ou secundárias, **ondas S**, shear ou ondas cortantes). Nas ondas longitudinais, as partículas do meio vibram na mesma direção em que as ondas se propagam e nas transversais, as partículas vibram perpendicularmente à direção de propagação (Figura 3A e 3B). Como exemplo de onda de pressão, a vibração que se propaga no ar com frequência compreendida entre 20hz e 20.000 hz, se denomina som e é uma onda compressiva P. As ondas P e S são estampadas na Figura 3.

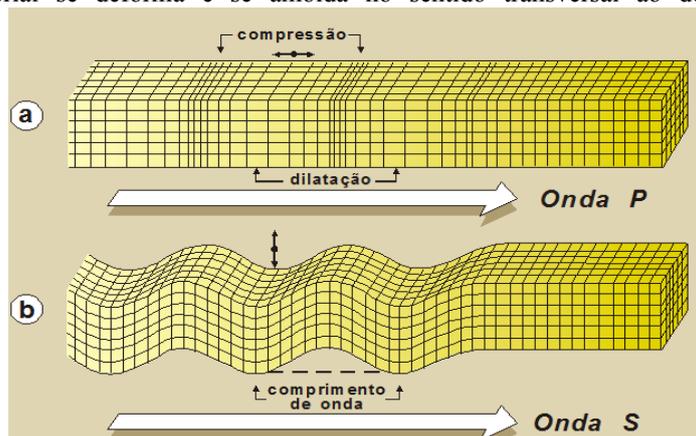
As **ondas P** possuem velocidade de propagação maior do que as **ondas S**, da ordem de 60% a 70% sendo portanto, as primeiras impressões registradas nos sismógrafos. As ondas P, compressivas, se propagam em meios, sólidos, líquidos ou gasosos, porém as ondas S, cortantes, propagam-se apenas em meios sólidos. As velocidades de propagação das ondas P e S dependem apenas do tipo de rocha, independente da amplitude ou frequência das vibrações, assim como a velocidade do som no ar (onda P) é sempre de 340 m/s. A título de dimensão de valores, a velocidade da onda P é, aproximadamente, 5000 m/s no granito e 1450 m/s na água.

A propagação das ondas P ocorre com alternância entre compressões e dilatações consecutivas do meio elástico, causando variações de volume do material e pode ser ilustrado pelo alongamento ou encurtamento de uma mola espiral sob o efeito de uma tração ou de uma compressão. A propagação das ondas transversais acontece com deslocamento lateral do meio sólido, com as partículas oscilando perpendicularmente à direção de propagação, causando variações de forma do material, o que é exemplificado pelo movimento ondulatório de uma corda, quando fixada a uma de suas extremidades. A Figura 4 ilustra as situações descritas.

3.2.2 Ondas Superficiais

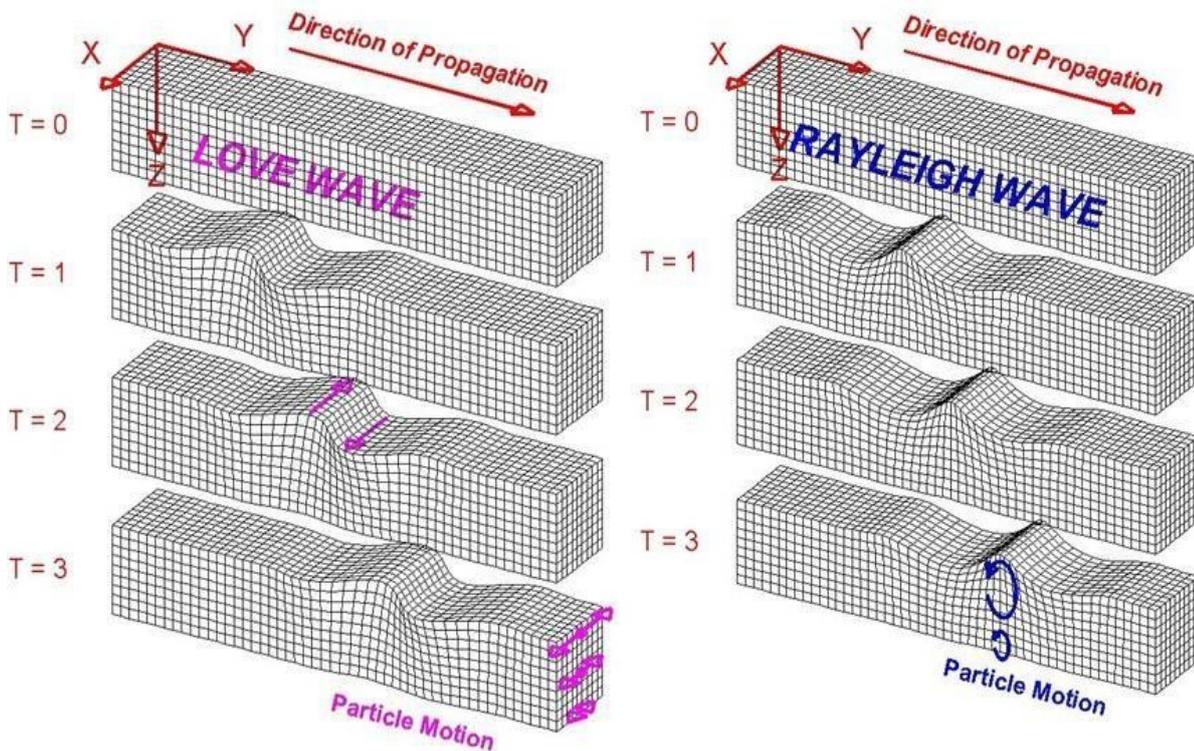
Dois outros tipos especiais de ondas sísmicas, mais lentas e letais do que as precedentes, são muito comuns: as **ondas de superfície** Love e Rayleigh, resultado da interação das ondas P e S entre si e com a superfície. Em ambas as amplitudes diminuem drasticamente com o afastamento da superfície porquanto sendo mais raso o hipocentro, menor a dissipação da energia por amortecimento. As ondas Love e Rayleigh são ilustradas na Figura 5.

Figura 3- a) Ondas P (longitudinais): o material dilata e contrai no sentido do deslocamento da onda. b) Ondas S (transversais): o material se deforma e se amolda no sentido transversal ao deslocamento da onda.



Fonte: Assumpção; Dias Neto (2000).

Figura 5- Ondas de superfície Rayleigh e Love. “Y” é a direção radial, ou direção de propagação da onda. “X” é a direção transversal, ou direção horizontal perpendicular à propagação. A oscilação da partícula na onda Rayleigh acontece nos eixos “X” e “Z” sendo uma elipse retrógrada no plano vertical radial. A vibração da partícula na onda Love é na direção “X”.



Fonte: Apostila do Curso de Verão IAG/USP, 2012.

Nas ondas Love, as partículas vibram na direção horizontal perpendicular à da propagação das ondas; este movimento é a consequência da interação das ondas S, polarizadas horizontalmente, com a superfície. Nas ondas Rayleigh as partículas oscilam num plano vertical descrevendo uma elipse (este movimento é similar ao das ondas do mar), resultado da sobreposição construtiva das ondas P e S com polarização vertical. Na realidade, a superposição construtiva ou não das ondas P e S e sua interação com a superfície sempre se manifestará como ondas superficiais, sendo os casos mais proeminentes a onda Love e a onda Rayleigh como descritas.

3.3 Medindo Os Terremotos – Intensidade Mercalli

Historicamente a maneira de se medir a intensidade de um sismo ou terremoto é a qualificação ou quantificação do efeito que ele causa. A classificação mais utilizada para os efeitos de um sismo é a chamada “Escala Mercalli”, com graus que variam de I a XII, conforme os efeitos nas pessoas, construções e na própria natureza. Portanto, é uma escala que não envolve medida direta com instrumentos, mas apenas classifica subjetivamente a intensidade das vibrações segundo a percepção do observador sobre os tremores sentidos e os estragos constatados. Apesar de se tratar

de uma escala subjetiva, mesmo sujeita a limites específicos, é importante no estudo dos sismos “históricos”, ou seja, dos sismos que não foram registrados por sismógrafos, como por exemplo, o sismo de 1886 no Rio de Janeiro. A Tabela 1 resume a descrição dos principais efeitos dos terremotos segundo a escala “Mercalli Modificada” de 1956, e os valores aproximados da aceleração no movimento do chão.

A intensidade das vibrações de um sismo depende da distância do epicentro. Um sismo relativamente pequeno, mas raso, pode causar sérios danos bem próximo ao epicentro (grande intensidade). Da mesma forma, sismos maiores como, por exemplo os sismos profundos do Acre, podem não causar dano algum na superfície (baixa intensidade) por ter o foco muito profundo. A escala Mercalli não é muito apropriada para medir o “tamanho” de um sismo, ou seja, a energia total liberada pela ruptura, embora possibilite avaliar qualitativamente as acelerações envolvidas. Para a estatura de um sismo usa-se a “escala de magnitude” desenvolvida originalmente em 1935 pelo sismólogo Charles Francis Richter, na Califórnia (EUA). A Escala Mercalli pode ser entendida, hodiernamente, como uma escala qualitativa da percepção individual e social das acelerações, velocidades ou deslocamentos do solo devido a fenômenos sísmicos, uma vez que envolve avaliações sensitivas do analista e demanda descrição orientada de danos à paisagem natural e cultural, no local de observação.

3.4 Medindo Os Terremotos – Escala De Magnitudes Richter

Magnitude é uma escala comparativa, visto que não se mensura um terremoto em laboratório. É o resultado de uma equação que relaciona, para um determinado sismógrafo numa determinada estação, as grandezas da onda sísmica: amplitude e período, e as grandezas do sismo: profundidade e distância. A medida da amplitude é realizada sobre o registro do sismógrafo através da leitura direta da ordenada do pico de onda e a medida do período é igualmente feita sobre o registro do sismógrafo, mensurando a diferença de abcissas entre os picos consecutivos de onda. São usualmente expressas em escala logarítmica pela grande diferença na dimensão das grandezas envolvidas. A medida da profundidade e da distância é calculada através das leituras dos tempos de chegada das ondas P e S em mais do que duas estações. A Figura 6 ilustra os procedimentos.

Tabela 1- Escala de Intensidade Mercalli Modificada (abreviada). A Escala Mercalli original de 1902 foi alterada em 1931 por A. Neumann com modificação nas descrições dos efeitos característicos de cada grau da escala e foi finalmente, em 1956, batizada de Escala Mercalli Modificada, comumente abreviada por “MM”, pelo sismólogo Charles Richter após a introdução de alterações nos graus de intensidade.

Grau	Descrição dos efeitos	Aceleração (g)
I	Não é sentido. Leves efeitos de período longo de terremotos grandes e distantes.	
II	Sentido por poucas pessoas paradas, em andares superiores ou em locais favoráveis.	<0,003
III	Sentido dentro de casa. Alguns objetos pendurados oscilam. Vibração parecida à passagem de um caminhão leve. Algumas pessoas sentem quantos segundos durou o tremor. Pode não ser reconhecido como um abalo sísmico.	0,004 – 0,008
IV	Objetos suspensos oscilam. Vibração parecida à de um caminhão pesado. Janelas, louças e portas fazem barulho. Paredes e estruturas de madeira rangem.	0,008 – 0,015
V	Sentido fora de casa. Algumas pessoas percebem de onde vêm as vibrações. Pessoas acordam. Líquido em recipiente é perturbado. Objetos pequenos e instáveis são deslocados. Portas oscilam, fecham e abrem.	0,015 – 0,04
VI	Sentido por todos. Muitos se assustam e saem às ruas. Pessoas andam sem firmeza. Janelas e louças são quebradas. Objetos e livros caem das prateleiras. Reboco fraco e construção de má qualidade racham.	0,04 – 0,08
VII	Difícil manter-se em pé. Objetos suspensos vibram. Móveis quebram. Danos em construção de má qualidade, e formam-se algumas trincas em construção normal. Queda de reboco, ladrilhos ou tijolos mal assentados e telhas. Ondas em piscinas. Pequenos escorregamentos de barrancos arenosos.	0,08 – 0,15
VIII	Danos em construções normais com colapso parcial. Algum dano em construções reforçadas. Queda de estuque e alguns muros de alvenaria. Queda de chaminés, monumentos, torres e caixas d'água. Galhos das árvores quebram-se. Trincas aparecem no chão.	0,15 – 0,3
IX	Pânico geral. Construções comuns são bastante danificadas, às vezes ocorre colapso total. Danos em construções reforçadas. Tubulação subterrânea quebrada. Rachaduras visíveis no solo.	0,3 – 0,6
X	A maioria das construções é destruída até as fundações. Danos sérios a barragens e diques. Grandes escorregamentos de terra. Água é lançada nas margens de rios e canais. Trilhos são levemente entortados.	0,60 – 1
XI	Trilhos são bastante entortados. Tubulações subterrâneas são completamente destruídas.	~1 – 2
XII	Destruição quase total. Grandes blocos de rocha são deslocados. Topografia e níveis são alterados. Objetos são lançados ao ar.	~ 2

Fonte: ASSUMPÇÃO; DIAS NETO (2000).

A fórmula genérica da magnitude Richter é expressa pela equação (2):

$$\mathbf{Mag} = \log(\mathbf{A/T}) + \mathbf{F(h, \Delta)} + \mathbf{C} \quad (2)$$

Onde:

Mag é a magnitude

A é a amplitude da onda

T é o período da onda

h é a profundidade do sismo

Δ é a distância do sismo à estação

C é um fator de correção local

Aplica-se uma escala logarítmica de base 10, onde cada unidade a mais de magnitude corresponde a um aumento de dez vezes na amplitude das ondas. Como magnitude, a escala não tem um valor limite inferior e o limite superior é verificado, na prática, pelo maior sismo ocorrido.

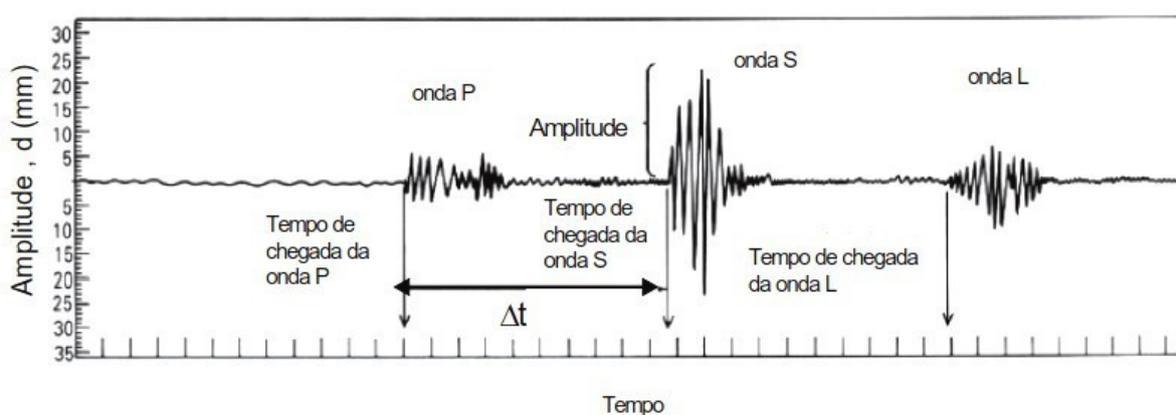
Seguindo a fórmula genérica há várias escalas de magnitude, adaptadas para medidas continentais estáveis intraplacas, como no nordeste norte-americano, para medidas de regiões de alta sismicidade em borda de placa como na Indonésia, ou para medidas em sismicidade de placas transcorrentes, como na Califórnia, onde Richter desenvolveu a escala primeira. Com relação às amplitudes medidas pode-se ter magnitude de ondas de corpo, M_b , quando são utilizadas as ondas P ou S, e magnitudes de ondas de superfície, M_s , quando são medidas nas ondas de superfície. Para utilização no Brasil o Prof. Dr. Marcelo Assumpção desenvolveu fórmula (3), baseada em dados empíricos brasileiros, compatível com a escala de magnitudes M_b e adequada às características intraplaca nacionais.

$$m_r = \log(A/T) + 2.3 * \log(R) - 1.48 \quad (3)$$

Onde:

R é a distância epicentral menor do que 1500 km e maior do que 200 km.

Figura 6- Registro típico de um sismo realçando os tempo de chegada de uma onda P, onda S, o intervalo de tempo entre elas e a chegada posterior de uma onda Love. Na onda S é destacada a medida de sua amplitude, parâmetro para alguns cálculos de magnitude.



Fonte:BLANDÓN(2003)

3.5 Equações De Atenuação Sísmica

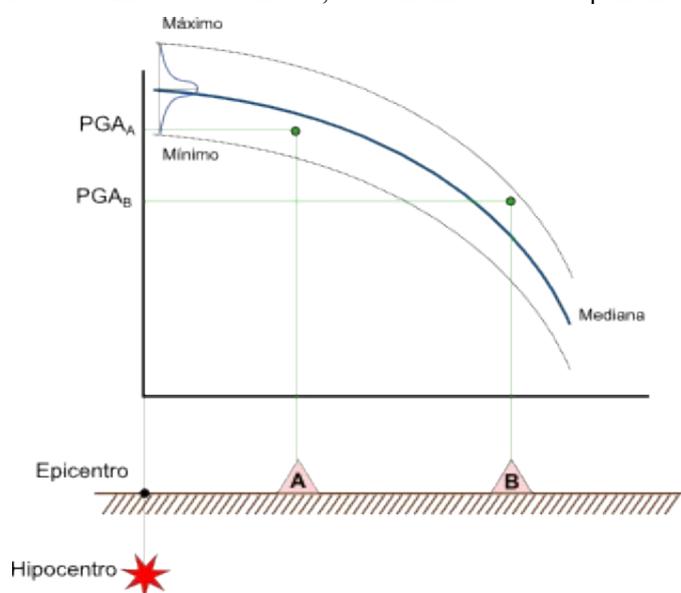
Os efeitos mensuráveis num objeto sob ação de uma onda sísmica são: deslocamento, velocidade e aceleração, que são grandezas relacionadas, visto que a velocidade é a derivada

matemática do deslocamento com o tempo e a aceleração é a derivada matemática da velocidade com o tempo. A aceleração é o parâmetro mais escolhido, pois multiplicada pela massa do objeto permite o cálculo direto das tensões atuantes no mesmo, seja ele um elemento de solo ou uma edificação. Alguns procedimentos de cálculo da ação dos esforços sísmicos nas estruturas são executados levando-se diretamente em conta o valor da aceleração sísmica e a massa da edificação.

Equações de atenuação são fórmulas obtidas experimentalmente, que determinam a intensidade da aceleração sísmica num determinado local. Estas fórmulas, simplesmente referidas como atenuação sísmica, são conhecidas também como Ground Motion Equation (GME), e fornecem um valor médio de aceleração ou outro parâmetro sísmico, com espalhamento gaussiano no entorno desta média, considerando a magnitude do evento, sua distância ao local observado, os efeitos do caminho percorrido pela onda, a diretividade da onda e os efeitos locais, que podem atenuar ou amplificar os valores das GMPs. O valor instantâneo máximo obtido pela aceleração num local é denominado PGA ou Peak Ground Acceleration.

Há muitos tipos de equações de atenuação, consoante o comportamento sísmico do local estudado. No Brasil são utilizadas as que se referem a uma plataforma continental, tectonicamente estável. O aspecto básico da curva de atenuação é desenhado na Figura 7. Pela ausência de dados autóctones, são utilizadas equações de atenuação de locais com perfil geográfico e comportamento tectônico similares, como é a região centro nordeste dos Estados Unidos. Neste trabalho serão utilizadas as equações de Shahram Pezeshk e de Gabriel Toro.

Figura 7- Curva de atenuação de aceleração, mostrando dois pontos A e B e as PGAs resultantes, a primeira abaixo da média e a segunda acima da média, conforme o espalhamento normal dos valores.



Fonte: a própria autora.

3.6 O Que É Perigo Sísmico

As consequências destrutivas das ondas sísmicas dependem não só da magnitude como também da distância focal, tipo de terreno, tipo de caminhamento das ondas sísmicas, como direção, polarização, diretividade (que é a trajetória no mesmo sentido da ruptura do sismo ou em sentido inverso ao da ruptura do sismo), obstáculos, interferências no percurso, características do local de chegada, assim como características estruturais das edificações nele fundeadas. A movimentação do solo devido à passagem da onda sísmica é proporcional à sua amplitude, e os parâmetros que descrevem esta movimentação, como aceleração, velocidade e deslocamento, são os protagonistas do estudo probabilístico do perigo sísmico, com utilização preferencial da grandeza aceleração na Engenharia Sísmica.

3.6.1 Perigo Sísmico (*Seismic Hazard*)

É a probabilidade da excedência de algum parâmetro sísmico (aceleração, velocidade ou deslocamento), para um determinado nível de intensidade, num período de tempo estipulado, num local definido e com uma frequência fixada.

3.6.2 Risco Sísmico

Do ponto de vista da Engenharia, o risco de um desastre está relacionado com a probabilidade de ocorrência do evento deflagrador e com as expectativas de perdas que o desastre pode causar, representando a medida da reparação destas perdas (NOBREGA, 2016).

Ou seja:

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade de ocorrência} * \text{Valor de reparação das perdas}$$

Na sismologia, o risco é a medida dos prejuízos econômicos, culturais e ambientais, esperados quando um objeto social ou natural estiver submetido à perigos sísmico. É proporcional à vulnerabilidade, ponderada pela probabilidade de excedência de um parâmetro sísmico limítrofe. A vulnerabilidade é dependente da localização, do tempo de possível exposição, e da capacidade de resistência à severidade do parâmetro excedente. Maiores vulnerabilidades acarretam, no caso da sismologia, maiores danos patrimoniais e naturais, promovendo maiores remodelações ambientais e sociais. O período de tempo de exposição referido, no caso de obras civis, é o tempo de utilização, que em geral, corresponde à vida útil do objeto em análise.

Ou seja:

$$\begin{aligned} \text{Risco Sísmico} &= \text{Perigo Sísmico} * \text{Vulnerabilidade Sísmica} \\ \text{Perigo Sísmico} &= \text{Probabilidade de excedência} \\ \text{Vulnerabilidade Sísmica} &= F(\text{Localização, Exposição, Resistência}) \end{aligned}$$

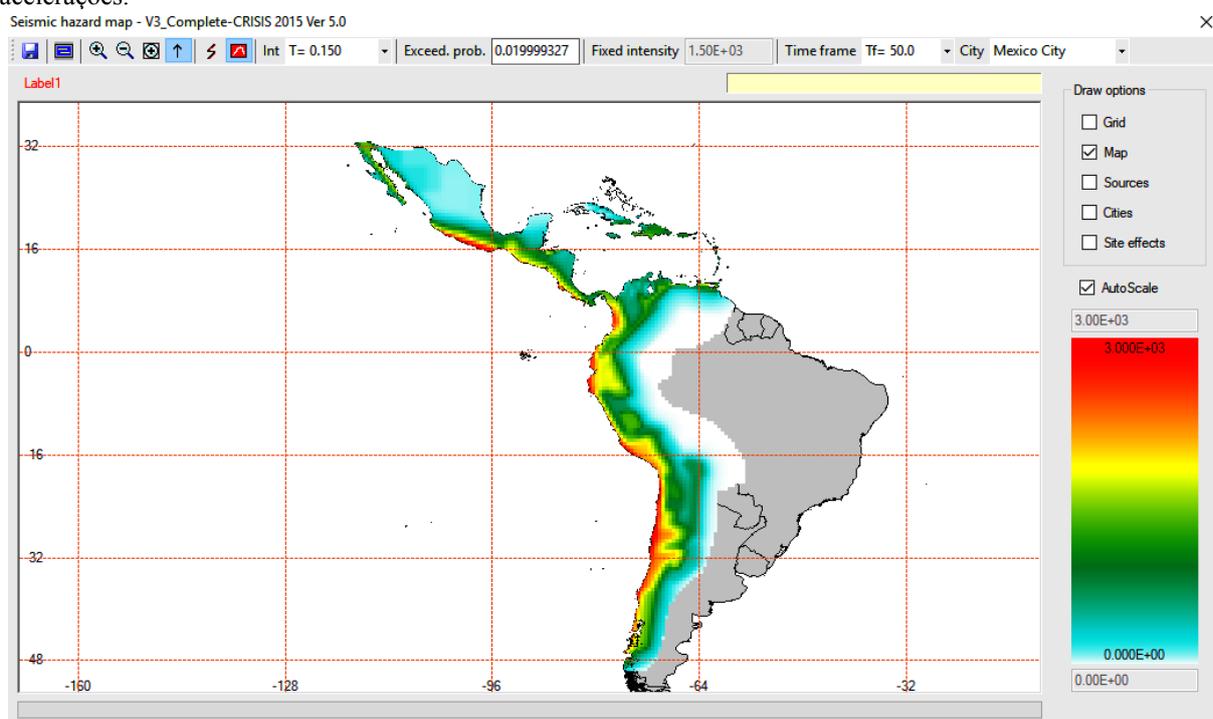
3.7 Mapeamento Do Perigo Sísmico

Quando se elabora uma análise probabilística de perigo sísmico regional, logra-se computar para todos os pontos da área, para um dado tempo de utilização, numa certa frequência de onda e para uma probabilidade de excedência escolhida, o valor de uma aceleração de solo, que será representado geograficamente num mapa ou matricialmente numa tabela. Exemplifica-se na Figura 8, onde as medidas de aceleração para a América do Sul e Central estão rasterizadas por interpolação, possibilitando o conhecimento de um valor para cada ponto do mapa.

3.7.1 Curva De Excedência De Probabilidade Ou Curva De Perigo Sísmico

A matriz de valores de aceleração obtida da análise probabilística possibilita plotar um gráfico de perigo sísmico para qualquer ponto da área em estudo, onde a curva decorrente nos indica, para cada tempo de utilização e para cada frequência de onda sísmica, a relação entre as **intensidades de aceleração** e as **probabilidades das mesmas serem excedidas** naquele intervalo de utilização. No mapeamento deste trabalho utilizou-se a frequência de 10 hz ou período de 0,1 s para acompanhar o padrão estabelecido pelo Mapa de Ameaça Sísmica do Brasil (DOURADO,2014), com tempo de utilização de 50 anos. Vide Figura 9.

Figura 8- Janela do software CRISIS mostrando uma distribuição de probabilidade de excedência de aceleração sísmica de 2% com tempo de utilização de 50 anos, aonde na região vermelha o valor de 3000 cm/s² tem 2% de probabilidade de ser excedido a cada 50 anos, indicando as cores quentes como indicadores de maiores acelerações.



Fonte: Software R-CRISIS(2019).

3.7.2 Curva De Aceleração Espectral

A curva de aceleração espectral, representa, em cada ou qualquer local, para uma determinada probabilidade de excedência, a variação das acelerações (ou outro parâmetro sísmico) como resultado da variação do período (ou frequência) de oscilação da onda sísmica, revelando a frequência que produz o valor de aceleração máximo. A curva da reação dinâmica de um objeto aí localizado é denominada Curva de resposta espectral e será coerente com a intensidade da aceleração atuante, e com a frequência da onda sísmica. O espectro de resposta é definido como o gráfico dos valores das reações elásticas desenvolvidas num conjunto de osciladores com um grau de liberdade e 5% de amortecimento, como um pêndulo invertido, por exemplo, frente à ação sísmica desenhada pela curva de aceleração espectral. Esta resposta reativa apresenta valor máximo na “frequência de ressonância” ou “frequência natural”, quando há sobreposição aditiva das oscilações ativas e reativas, com majoração das amplitudes. O espectro de resposta é também especificado em norma, onde são consideradas as características do local e da ação sísmica, compondo uma curva idealizada que indica os valores mínimos a serem considerados na análise sísmica. O espectro de projeto opta pela curva dinâmica ou regulamentar que otimiza a segurança

estrutural. Observa-se na Figura 9 o espectro de aceleração máximo e a curva de excedência de um local.

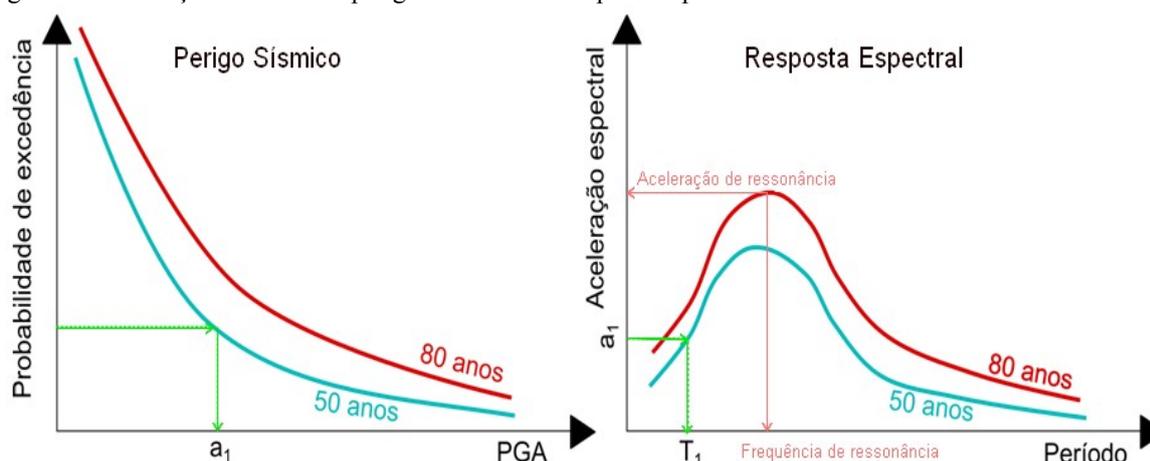
Figura 9- Janela do software R-CRISIS mostrando uma curva de perigo sísmico à esquerda e a curva de resposta espectral à direita para um ponto determinado por coordenadas. No gráfico à esquerda observa-se que as probabilidades são maiores para as pequenas acelerações. No gráfico à direita verifica-se um máximo no eixo das acelerações no período de 0.1s ou 10hz, que é a frequência da maior aceleração no local, para aquela condição de tempo de utilização. A resposta espectral uma estrutura deve ser díspar ou inferior ao espectro de resposta do local para não haver ressonância.



Fonte: a própria autora na utilização do Software R-CRISIS(2019)

Exemplificando a utilização das curvas, ao escolher uma probabilidade de excedência, para uma frequência e para um tempo de retorno obtêm-se uma aceleração, menor do que a máxima estabelecida por critério técnico, que indicará a frequência de oscilação, que deverá ser distinta da frequência de ressonância do sistema oscilador. Ou, inversamente, escolhe-se uma frequência no gráfico de resposta espectral, obtêm-se nele uma aceleração, que indicará no gráfico das curvas de perigo sísmico, sua probabilidade de excedência, procedimento ilustrado na Figura 10.

Figura 10- Utilização da curva de perigo sísmico e de resposta espectral.



Fonte: a própria autora.

3.8 Importância Da Mensuração Da Perigo Sísmico

O mapa dos valores de aceleração sísmica que podem ocorrer segundo uma determinada probabilidade de excedência sobre um determinado tempo de utilização, indica os pontos onde a aceleração excede a norma técnica, sinalizando nestes locais, a necessidade da adoção de medidas e procedimentos para a redução da vulnerabilidade ao facear o perigo sísmico, sobretudo nas obras civis de grande porte, como barragens de contenção de água ou de rejeitos de minério, de alto risco, como nas usinas nucleares, nos locais de grande aporte de pessoas, como nos estádios, nas edificações de segurança, educação, administração pública e governança, na infraestrutura de saneamento e distribuição elétrica, e também, adicionalmente e dentre outros, nas obras com dimensionamento estrutural ousado, de grande esbeltez, cobertura em placas finas, sob atuação de forças dinâmicas ou mesmo sob outras ações naturais cíclicas como o vento. De posse do mapeamento das acelerações sísmicas e com o gráfico de resposta espectral, pode-se inferir os esforços sísmicos que deverão ser considerados na elaboração de um projeto estrutural sujeito à ação sísmica.

O mapeamento é também um guia para a elaboração e correção de normas técnicas e de códigos de obras regionais. Visto ser dinâmica a atualização dos mapas de aceleração sísmica, como resultado dos avanços no conhecimento da nossa estrutura crustal, os novos valores de aceleração sísmica devem ser considerados na norma brasileira NBR 15421, em suas próximas revisões.

3.9 Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)

Probabilistic Seismic Hazard Analysis é uma metodologia probabilística, baseada na aplicação do Teorema da Probabilidade Total e da regra de Bayes, utilizada para calcular o perigo sísmico, através da determinação de valores de probabilidade de excedência de parâmetros que sejam toleráveis a um padrão de avaliação em que se leva em conta o tempo de vida e a relação custo-benefício da redução da vulnerabilidade sísmica das estruturas, além de outras considerações a critério do analista e subordinadas à Norma Brasileira 15421, ou às Normas internacionais de procedimentos e cálculos para projetos de estruturas resistentes a sismos.

Esta metodologia não busca elucidar, desprezar ou minimizar as incertezas, epistêmicas ou aleatórias, mas as incorpora ao processo de cálculo, proporcionando uma gama de soluções, das quais algumas serão escolhidos pelo analisador segundo seus critérios e conveniências. É um procedimento livre, múltiplo, que permite a eleição do resultado mais seguro, mais conveniente,

para as particularidades do estudo em pauta, em convergência com a redução profícua da fragilidade sísmica nas obras civis, não só as de grande porte, importância ou alta complexidade e exigência tecnológica, como também as obras populares, mais simples e frágeis, localizadas em áreas de maior excedência de parâmetros.

3.9.1 Sequência Da Aplicação Da Metodologia De Cornell, Ou PSHA.

A análise probabilística de perigo sísmico, ou Probabilistic Seismic Hazard Analysis-PSHA como é conhecida, é desenvolvida em segundo a sequência:

- Escolha da área de estudo e coleta de dados sísmicos da área.
- Identificação das fontes sísmicas capazes de produzir movimento sísmico.
- Caracterização da distribuição das magnitudes dos sismos contidos nas fontes, buscando aderência com um modelo temporal de recorrência.
- Adoção de um modelo de atenuação do parâmetro da aceleração, em função da magnitude, distância, efeito local, caminho percorrido, diretividade, dentre outros.
- Elaboração das curvas de perigo sísmico que correlacionam, para cada intervalo de tempo, o valor do parâmetro e a probabilidade dele ser excedido naquele intervalo de tempo.

3.9.1.1 Coleta De Dados

Para a análise probabilística dos eventos sísmicos é utilizada uma fonte de dados, seja na forma de publicação na forma de catálogo ou boletins sísmicos, seja pela coleta, análise e sistematização de dados instrumentais, seja pela pesquisa bibliográfica ou busca histórica de eventos sísmicos. Para sua utilização no desenvolvimento da modelagem temporal da recorrência, estes devem estar homogeneizados em suas grandezas físicas, isentos de repetições, declusterados (sem a presença de enxame de tremores pré ou pós sismos de maior monta), devem ter fidelidade estatística e estar completos no tempo o que significa que todos os sismos de informação confiável e acima de uma determinada magnitude devem estar relatados no intervalo de tempo de pesquisa.

3.9.1.2 Identificação Das Fontes Sismogênicas

A ordenação espacial dos terremotos, tipificada por seus hipocentros, aliada à análise geológica da região em estudo e à confiabilidade dos valores de magnitude, localização e data de

ocorrência dos sismos históricos e instrumentais tabulados, é associada a uma falha tectônica ou estrutura geológica, ou, na ausência de falha conhecida ou estrutura geológica identificável, confinada em linhas, áreas ou volumes, de geometria e concavidade variável, com diversas orientações de atitude, direção e mergulho, denominada Fonte Sísmica, onde se assume haver uma função de distribuição espacial desta ordenação (BAKER). Neste trabalho foram assumidas fontes sísmicas planas não retangulares e convexas, com distribuição uniforme de eventos, por capacidade limitada de processamento. As Fontes Sísmicas planas são também denominadas Áreas Sísmicas.

3.9.1.3 Identificação Da Recorrência De Magnitudes

Uma relação de recorrência indica a probabilidade de um sismo de uma determinada magnitude ocorrer em qualquer lugar de uma fonte sísmica durante um especificado período de tempo, em geral um ano (Reiter, 1991).

A relação de recorrência de magnitudes mais utilizada foi criada por Gutenberg e Richter, em 1944, analisando terremotos da Califórnia, onde verificaram localmente e hoje comprovado universalmente, que a taxa anual dos sismos e suas respectivas magnitudes, numa região, são associadas pela identidade logarítmica representada na equação (4):

$$\log(\lambda_M) = a - (b * M) \quad (4)$$

Onde:

λ_M é a taxa anual de sismos maiores do que M (todos os sismos ocorridos num intervalo de tempo, dividido pelo número de anos do intervalo).

a é uma constante que representa a taxa anual da totalidade dos sismos da região.

b é uma constante relacionada à taxa entre pequenos e grande terremotos da região e seu valor tipo se aproxima de 1.

As fórmulas relativas à função de probabilidade acumulada (CDF) e função densidade de probabilidade (PDF) das magnitudes dos terremotos, derivadas da igualdade de Gutenberg Richter, são respectivamente as equações (5) e (6):

$$F_M(m) = 1 - 10^{-b(m - m_{MIN})} \quad (5)$$

e

$$f_M(m) = b \ln(10) 10^{-b(m - m_{MIN})} \quad (6)$$

Onde:

$F_M(\mathbf{m})$ é a função de probabilidade acumulada,
 $f_M(\mathbf{m})$ é a função densidade de probabilidade,
 b é a constante b da equação de Gutenberg Richter,
 m é o valor de magnitude para o qual se busca a probabilidade,
 m_{MIN} é a magnitude mínima.

Condição: $m > m_{MIN}$

As fórmulas (7) e (8) também são semelhantes às fórmulas (5) e (6) com a inclusão de uma magnitude máxima:

$$F_M(\mathbf{m}) = 1 - 10^{-b(m - m_{MIN})} / 1 - 10^{-b(m_{MAX} - m_{MIN})} \quad (7)$$

e

$$f_M(\mathbf{m}) = b \ln(10) 10^{-b(m - m_{MIN})} / 1 - 10^{-b(m_{MAX} - m_{MIN})} \quad (8)$$

3.9.1.4 Modelação Das Distâncias Da Fonte Sismogênica Ao Sítio De Interesse

Uma vez definida a geometria da fonte sismogênica, seja ela pontual, linear, plana ou espacial, é imperioso o estabelecimento de uma função de distância ou de uma matriz de distâncias ou a utilização de métodos numéricos para a obtenção do caminho entre cada ponto da fonte sismogênica e cada ponto da área de atuação dos esforços sísmicos das fontes.

3.9.1.5 Estabelecimento De Um Modelo De Predição De Aceleração Sísmica

A atenuação da aceleração é influenciada por um rol de fatores como magnitude, distância, efeito local, caminho percorrido, diretividade e outros, onde ressaltam com evidência a magnitude do sismo e a sua distância ao sítio de interesse e pode ser representada equação (9):

$$\ln(\mathbf{a}) = \ln(\mathbf{a})(\mathbf{M}, \mathbf{R}, \theta) \mp \sigma(\mathbf{M}, \mathbf{R}, \theta) \quad (9)$$

Onde:

$\ln(\mathbf{a})$ é o logaritmo natural da aceleração sísmica.

\mathbf{M} é a magnitude

\mathbf{R} é a distância (epicentral, hipocentral ou projeções)

θ representa outros fatores como efeito local, características do caminho da onda, diretividade da onda com a ruptura, etc.

$\ln(\mathbf{a})(\mathbf{M}, \mathbf{R}, \theta)$ é a média de $\ln(\mathbf{a})$, modelada como variável e como distribuição normal.

$\sigma(\mathbf{M}, \mathbf{R}, \theta)$ é o desvio padrão.

O gráfico genérico da atenuação está representado na Figura 11.

Estes fatores concatenados compõem modelos, concebidos com análise de regressão linear sobre coleções de dados tabulados, que permitem o estabelecimento de um valor médio de aceleração no ponto em estudo, acrescido de uma variação que pondera o espalhamento dos valores do parâmetro segundo uma distribuição normal, adotando-se um múltiplo de seu desvio padrão como adição para valores pretendidos acima da média ou como subtração para valores pretendidos abaixo da média, segundo critério do analista. Neste trabalho adotou-se um múltiplo nulo, por razões de limitação de processamento.

Fórmula geral da distribuição do parâmetro medido, equação (10), segundo a notação de Baker(2008):

$$\ln(\mathbf{a}) = \ln(\mathbf{a})(\mathbf{M}, \mathbf{R}, \theta) + \sigma(\mathbf{M}, \mathbf{R}, \theta) * \varepsilon \quad (10)$$

Onde:

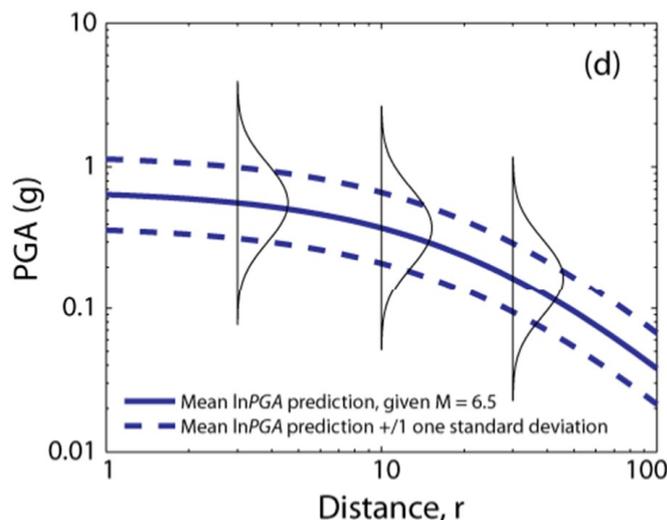
$\ln(\mathbf{a})$ é o logaritmo natural da aceleração sísmica.

$\ln(\mathbf{a})(\mathbf{M}, \mathbf{R}, \theta)$ é a média de $\ln(\mathbf{a})$, modelada como variável e como distribuição normal.

$\sigma(\mathbf{M}, \mathbf{R}, \theta)$ é o desvio padrão.

ε é a variável multiplicadora do desvio padrão, limitando, no valor final da aceleração, o espalhamento verificado nas ordenadas.

Figura 11- Espalhamento vertical, ou na ordenada do parâmetro PGA, dada uma distância.



Fonte: Baker (2013).

3.9.1.6 Fórmula Final Do PSHA

Consonante com a análise Bayesiana retromencionada demonstra-se que para uma fonte única, a probabilidade de um parâmetro sísmico, denominado aqui de \overline{PS} , num determinado ponto ultrapassar um determinado valor, é, na sua forma contínua, representada pela equação (11):

$$P(\overline{PS} > x) = \int_{M_{MIN}}^{M_{MAX}} \int_{R_{MIN}}^{R_{MAX}} (\overline{PS} > x | m, r) f_M(m) f_R(r) dm dr \quad (11)$$

Onde:

PS é um parâmetro como aceleração ou deslocamento do solo,

x é um valor arbitrário.

M, m são notações de magnitude

R, r são notações de distância

$(PS > x | m, r)$ é a probabilidade de PS ser maior do que x , dadas a magnitude e a distância.

$f_M(m)$ é a função de densidade de probabilidade de magnitude

$f_R(r)$ é a função de densidade de probabilidade de distribuição dos sismos

dm, dr são infinitesimais das funções $f_M(m)$ e $f_R(r)$

Equação que pode ser representada na forma discreta, equação (12), mais apropriada para a manipulação computacional dos dados tabulados e calculados:

$$P(\overline{PS} > x) = \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} P(\overline{PS} > x | m_j, r_k) P(M = m_j) P(R = r_k) \quad (12)$$

Onde:

PS é um parâmetro como aceleração ou deslocamento do solo,

x é um valor arbitrário.

M, m_j são notações de magnitude

R, r_k são notações de distância

$(PS > x | m_j, r_k)$ é a probabilidade de PS ser maior do que x , dadas a magnitude j e a distância k .

$P(M = m_j)$ é igual a probabilidade da magnitude M ser igual a m_j

$P(R = r_k)$ é igual a probabilidade da distância R ser igual a r_k

Nestas fórmulas, as probabilidades condicionais $(\overline{PS} > x | m, r)$ e $(PS > x | m_j, r_k)$ são obtidas por meio de modelos preditivos do parâmetro escolhido. No caso de aceleração, são os modelos de atenuação sísmica.

As probabilidades de magnitudes são resultantes da relação de Gutenberg Richter e as probabilidades das distâncias são calculadas segundo a espacialização das áreas sísmicas e da região em estudo, observando que nas fontes sísmicas onde se admite uma distribuição uniforme de sismos, a probabilidade de ocorrência de um evento é a mesma para todos os pontos.

De forma análoga, pode ser inferida a quantidade de vezes que o parâmetro escolhido ultrapassa o valor x arbitrado no intervalo de tempo no caso contínuo, consoante equação (13):

$$\lambda(\overline{PS} > x) = \lambda(M > m_{MIN}) \int_{M_{MIN}}^{M_{MAX}} \int_{R_{MIN}}^{R_{MAX}} P(\overline{PS} > x | m, r) f_M(m) f_R(r) dm dr \quad (13)$$

Onde:

λ é a representação do número de vezes, no intervalo de tempo, que o parâmetro \overline{PS} ultrapassa o valor arbitrado x .

Ou a mesma inferência no caso discreto, segundo equação (14):

$$\lambda(\overline{PS} > x) = \lambda(M > m_{MIN}) \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} P(\overline{PS} > x | m_j, r_k) P(M = m_j) P(R = r_k) \quad (14)$$

Onde:

λ é a representação do número de vezes, no intervalo de tempo, que a magnitude ultrapassa a magnitude mínima estabelecida.

Para as fontes múltiplas, separadas espacialmente ou fontes em graticulado, é realizada a somatória, na forma discreta, ou a integral, na forma contínua, das probabilidades ou taxas obtidas para cada uma das fontes.

3.10 Fluxograma Do Procedimento PSHA

O fluxograma dos passos necessários para a elaboração da Análise Probabilística de Perigo Sísmico utilizando a notação de Baker(2008), é mostrado na Figura 12, ressaltando que o fluxo de processamento é realizado para cada uma das fontes de forma independente e posteriormente adicionados para o resultado final.

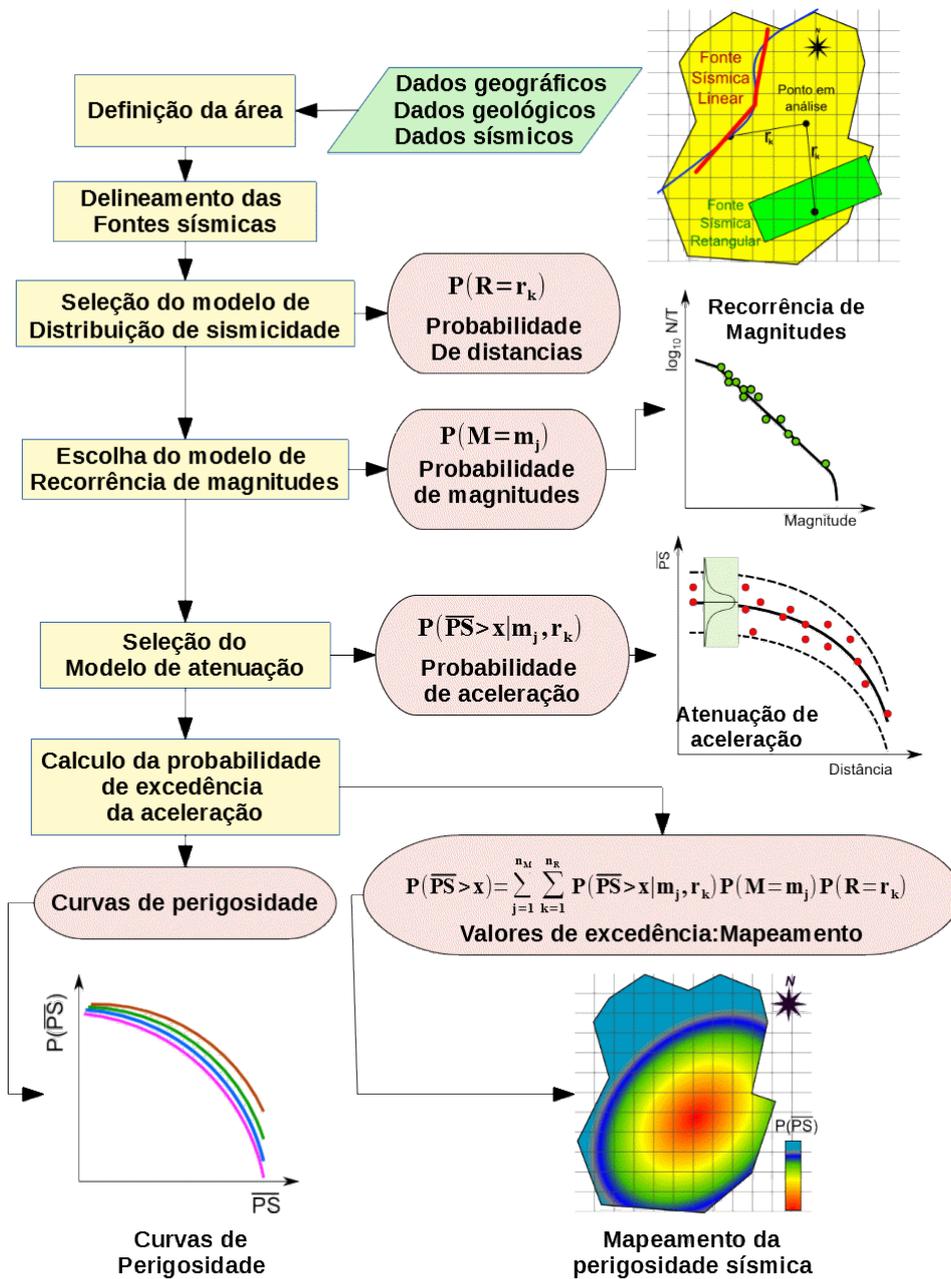
3.11 Norma Técnica Brasileira

A Norma Técnica Brasileira ABNT NBR 15421, denominada “Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento”, rateia o território brasileiro em 5 regiões sísmicas, conforme Figura 13, em consonância com as acelerações mapeadas pelo Global Seismic Hazard Map, realizado em 1999, pelo Global Seismic Hazard Assessment Program - GSHAP ilustrado na Figura 14 e em concordância com as normas técnicas dos países vizinhos, sobretudo na fronteira ocidental do Brasil, onde a influência da subducção da placa de Nazca ainda se faz presente. Este aquinhoamento é a orientação da NBR 15421 para a definição da magnitude dos esforços a serem considerados num procedimento de projeto sismo resistente. Observa-se uma abordagem conservadora, alocando-se a maior parcela da nossa extensão territorial na Zona zero, com aceleração sísmica horizontal de 0,025 g, sendo que alguns de nossos maiores eventos históricos estão nesta área, citando o terremoto de Porto dos Gaúchos na Serra do Tombador em 1955, com magnitude entre 6,3 e 6,8.

A norma 15421 estabelece critérios de caracterização de esforços sísmicos a serem assumidos pelo projetista, como valores característicos de aceleração e curva de resposta espectral regulamentada, assim como detalhamento de peças estruturais, categorização das edificações segundo utilização, importância e localização, irregularidades estruturais no plano horizontal e no corte vertical, local e direção de aplicação das forças sísmicas, modelagem da fundação como âncora da estrutura, modelagem da rigidez dos vínculos das estruturas, limitações de deslocamentos e juntas de dilatação, requisitos para componentes não estruturais, classificação dos solos de apoio às fundações, entre outras recomendações.

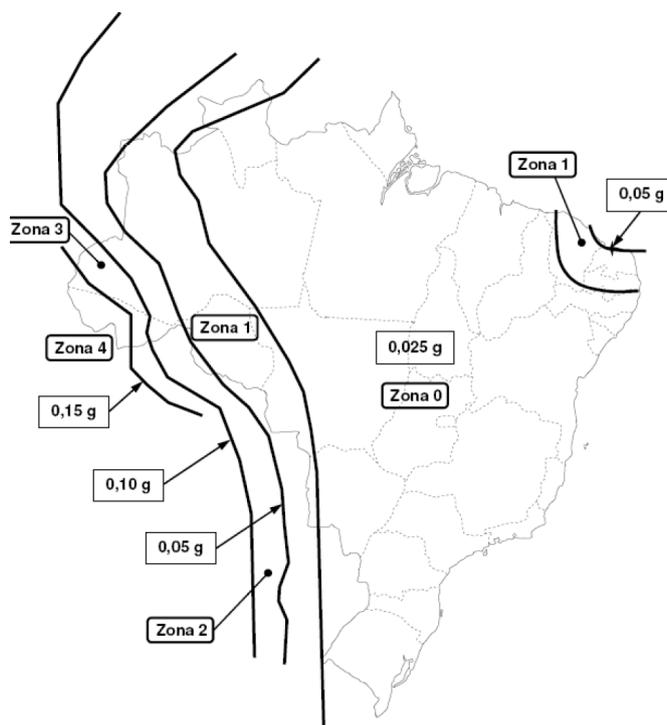
Vale ressaltar que na norma brasileira, “Os valores a serem definidos como características nominais para as ações sísmicas são aqueles que tem 10% de probabilidade de serem ultrapassados no sentido desfavorável, durante um período de 50 anos, o que corresponde a um período de retorno de 475 anos”, o que sinaliza o tempo de utilização e o tempo de recorrência que devem ser aplicados na estimativa das acelerações sísmicas através dos métodos probabilísticos.

Figura 12- Fluxograma da metodologia e aplicação do PSHA, onde em verde está a introdução dos dados geográficos, geológicos e sísmicos, em amarelo estão os processos e em rosa os resultados. As figuras são ilustrativas das etapas.



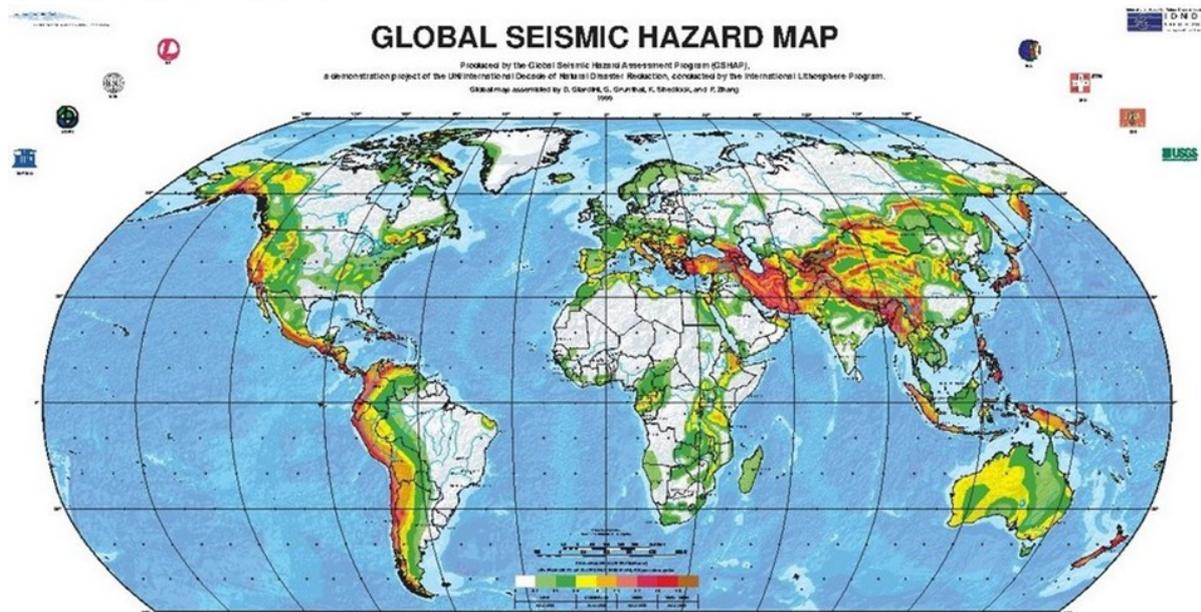
Fonte: a própria autora.

Figura 13- Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil, pela Norma Brasileira NBR 15421, para terrenos classe B(“Rocha”). Novamente observa-se a generalidade na distribuição das acelerações de projeto, não contemplando as irregularidades regionais e adotando uma extensão de medidas acanhadas para as singularidades regionais.



Fonte: ABNT NBR 15421 (2006)

Figura 14- GSHAP Global Seismic Hazard Assessment Program, onde se observa ser o Brasil considerado uma área com sismicidade muito fraca.



Fonte: GSHAP Global Seismic Hazard Assessment Program (1999).

4 SISMICIDADE NA BACIA SEDIMENTAR DO PANTANAL

O Pantanal é uma bacia sedimentar cenozoica, estruturada por falhas, posicionada na Bacia do Alto Paraguai, Região Centro-Oeste do Brasil, consistindo na maior expressão neotectônica do Estado de Mato Grosso do Sul (Facincani, 2007). Considerada a maior planície alagável contínua do mundo, está localizada entre as coordenadas 15° 32' 19" S ao norte, 22° 8' 12" S ao sul, 54° 54' 34" O a leste e 59° 21' 6" O a oeste, com aproximadamente 154.000 km², a maior parte em território brasileiro, nos Estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (Figura 15A). É contornada por formações pré cambrianas ao Norte, Oeste e Sul, representados, respectivamente, pelas serras dos Guimarães, Parecis, Urucum, Amolar e Bodoquena, e flanqueada a leste por uma escarpa longa, linear, com mergulho vertical e direção SSW-NNE, onde afloram as rochas paleozoicas e mesozoicas da Bacia do Paraná e pré cambrianas do Grupo Cuiabá (FACINCANI *et al*, 2011). Seu embasamento é irregular, raso, com menos de 600 m, sulcado por falhamento variado em direção, mergulho, atitude e natureza de esforços, apresentando uma grande depressão crustal em sua área central (Figura 15B e 15C). A presença de feições geomórficas com alinhamento preferencial NE SW pode ser indicativo de tectonismo associado a estruturas do Lineamento Transbrasiliense (ASSINE 2003).

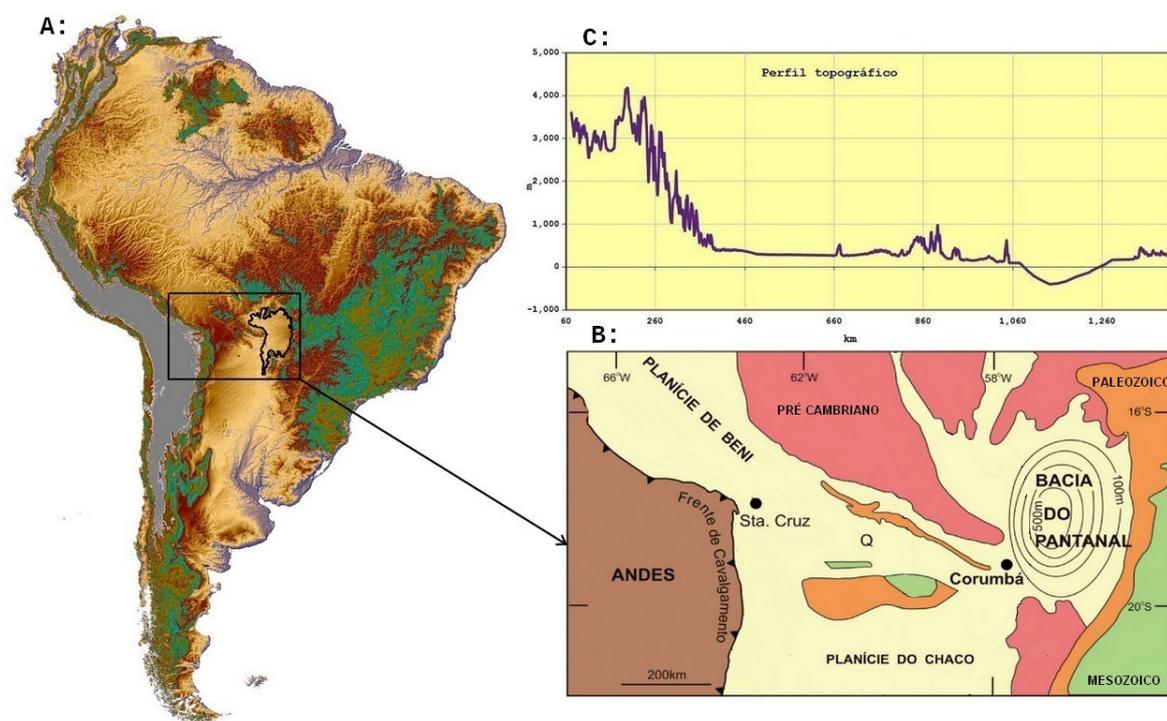
O preenchimento e drenagem da bacia sedimentar do Pantanal é feito por um extenso trato de grandes sistemas aluviais, cujo tronco coletor é rio Paraguai (ASSINE; SOARES, 2004), onde se destacam os percursos dos rios Taquari, Negro, Piquiri e São Lourenço com suas vazantes contribuintes (drenagens secundárias), lagos, denominados corixos, e lagoas salinas isoladas em sua porção centro-sul denominada Nhecolândia. A extensão da planície, conjugada com o seu baixo gradiente topográfico gera a sazonalidade geograficamente progressiva e anual das inundações, de lento escoamento, com permanência nos meses de verão e picos de vazão com recorrência plurianual.

4.1 Sismicidade Global

Segundo a teoria da tectônica de placas, a maior parte dos terremotos ocorre em suas bordas, na interação física de aproximação e contato, afastamento ou escorregamento entre elas. As tensões geradas nos eventos de borda de placa são propagadas para seu interior, criando um novo cenário de tensões que resultam nos denominados "sismos intraplaca", que são, em sua maioria, sismos de baixa ou média magnitude, rasos, em geral até 30 ou 40 km de profundidade. Porém, ocorrem sismos intraplaca de grande magnitude, como o retro citado terremoto da Serra do

Tombador em 1955, Mato Grosso, de magnitude 6,2 mb, que foi o maior sismo brasileiro; ou o paradigmático sismo intraplaca da cidade de Nova Madrid, Estados Unidos, no início do século 19, onde numa sequência de tremores foi atingido o pico de 8,1mb, considerado o maior sismo norte-americano.

Figura 15- A: Localização do Pantanal na América do Sul B: caracterização da geologia (imagem proveniente de Assine et al 2015) e C: perfil topográfico do retângulo envolvente mostrando a depressão central. Relevo e perfil elaborados com dados do modelo digital de elevação proveniente do U.S. Geological Survey com precisão de 30' (Center for Earth Resources Observation and Science).



Fonte: MDT GTOPO30, Mapa geológico, Assine et al (2015). Perfil topográfico e composição, a própria autora.

4.2 Sismicidade No Brasil

O território brasileiro, localizado no interior da placa Sul americana, ostenta comportamento sísmico tipicamente intraplaca, vide Figura 02 (fls. 19), onde os eventos sísmicos, em sua maioria, apresentam hipocentros rasos, abaixo dos 40 km, magnitudes abaixo de 3 mb, com notáveis exceções anteriormente apontadas. Outrossim são registradas atividades sísmicas relacionadas ao movimento da extremidade oriental da subducção da placa de Nazca, de grandes magnitudes e profundos hipocentros, como o sismo ocorrido no Acre, com epicentro no Brasil e hipocentro a 550 km de profundidade desvelando uma magnitude de 7.1 mb (HASUI et al, 2012). Outrora considerado assísmico por não apresentar registros de tremores destrutivos, o pequeno número de abalos observado era interpretado como ocorrência de colapso de tetos de cavernas, deslizamento de

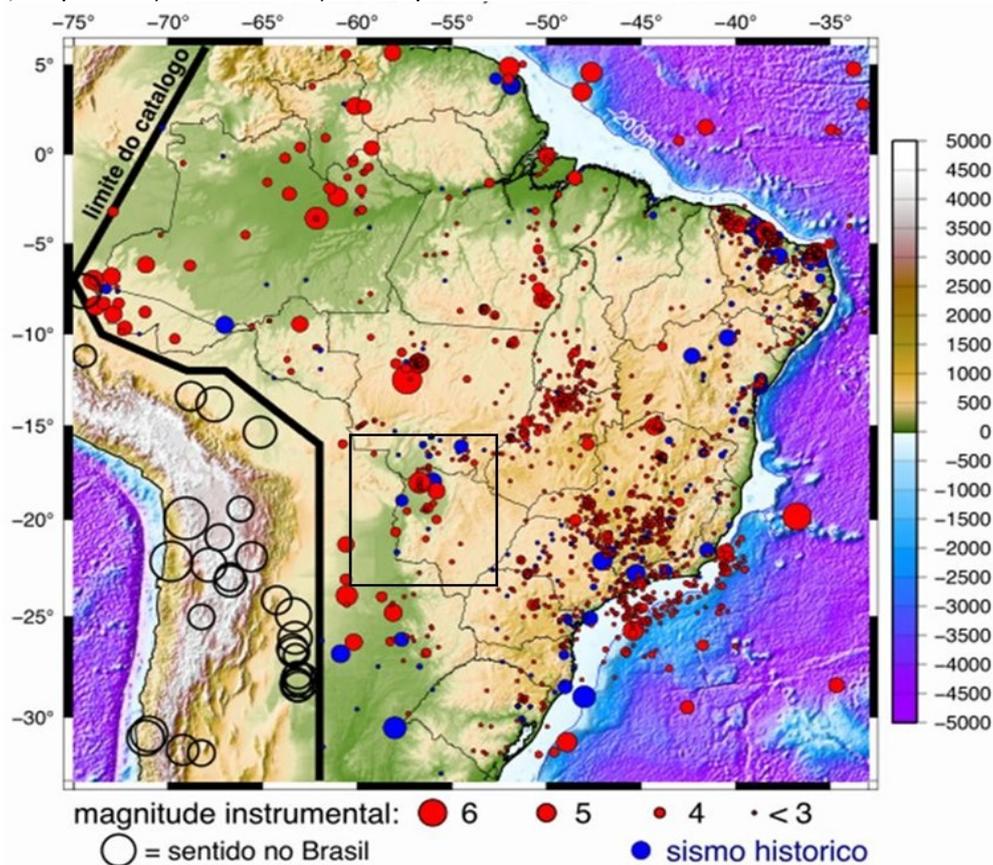
terra ou simples acomodações de camadas. A partir da década de 70, com o incremento dos estudos geofísicos brasileiros, mostrou-se que a atividade sísmica no Brasil não pode e não deve ser desprezada (vide Figura 16), por ser o resultado de forças tectônicas que atuam conjuntamente em toda a extensa placa que contém o continente sul-americano (ASSUMPÇÃO; DIAS NETO, 2000).

4.3 Sismicidade Na Bacia Sedimentar Do Pantanal

Branner, em 1912 fez, provavelmente, a primeira referência à sismicidade do Pantanal, na obra "Earthquakes in Brazil" onde destaca as regiões sísmicas do Nordeste, do Sudeste e do Centro-Oeste, ilustrado na Figura 17. Os registros primevos da sismicidade pantaneira foram conhecidos após a instalação das primeiras estações sismográficas brasileiras, que auxiliaram no esboço das principais áreas sísmicas do Brasil. Com a instalação e densificação da Rede Sismográfica Brasileira, pôde-se constatar a alta sismicidade da Bacia Sedimentar do Pantanal, conforme demonstrado por vários autores como Assumpção, Facincani, Dias, Silva, Hasui, entre outros. A coleta dos dados registrados pelas estações sismográficas após sua implantação pela Rede Sismográfica Brasileira, a catalogação dos sismos históricos (Berrocal *et al.*, 1984), e a revelação dos sismos inéditos (Silva, 2017) enriqueceu o conhecimento da quantidade e espacialização dos eventos sísmicos, permitindo uma análise de completude por magnitude ao longo do tempo. Completude significa o momento a partir do qual todos os sismos de uma certa magnitude estão arrolados, ou seja, estão completos; pode ser conhecida através do Método Cumulativo Visual, de Mulargia e Tinti (1985), baseado na relação linear entre o número acumulado de eventos de uma determinada magnitude, com o respectivo intervalo temporal (Ahmad, 2016).

“A completude dos dados, no entanto, continua muito variável com a época e com a região pois há mais informações de sismos na região Sul e Sudeste do que na Amazônia, devido à maior população e ao maior número de estações sismográficas” (Catálogo Brasileiro de Sismos, IAG USP). A afirmativa é igualmente válida para o Centro-Oeste, sobretudo o Pantanal, pela baixa população e pela ausência de sismógrafos, situação hoje em reversão pelo trabalho desenvolvido pela UFMS e pelo IAG USP, destacando-se a implantação pioneira da estação sismográfica de Aquidauana, AQDB, em 2011. A densificação de registros é demonstrada na Figura 18.

Figura 16- Boletim Sísmico Brasileiro (1720-2015/12), com detalhamento da área de estudo e adjacências representado pelo retângulo, e representação da distribuição dos epicentros dos sismos brasileiros.



Fonte: IAG/USP (2016).

Interpreta-se a sismicidade no Pantanal como reativação tectônica do Lineamento Transbrasiliano (Soares *et al.* 1998, Riccomini and Assumpção 1999, Assine 2004, Assine and Soares 2004, Facincani 2007, Facincani *et al.* 2011, 2012, Paranhos Filho *et al.* 2013), modelo corroborado pela distribuição espacial de sismos que sugere uma continuidade da faixa sísmica de Goiás-Tocantins. Todavia, há a acepção de que esta atividade seja conjugada à contínua subsidência de uma antiga elevação divisora de águas e fornecedora de sedimentos para as atuais bacias do Paraná e do Chaco, iniciada com a orogênese dos Andes e causa da origem da atual bacia sedimentar (Ab'Saber, 1988). Recentes estudos geodésicos na região de Corumbá, às margens do rio Paraguai, na extremidade ocidental da planície pantaneira, indicam serem os ciclos de enchente e seca possíveis atores no desequilíbrio isostático e indutores de sismos regionais, dada a alternância da carga de pressão de água sobre a área associada à sua capacidade de percolação, atuando como lubrificante nas fraturas crustais (PARANHOS *et al.* 2018). Destaca-se o modelo do adelgaçamento e flexionamento do manto pelo aquecimento e soerguimento da litosfera, com o aparecimento de tensões superficiais e decorrentes terremotos (ASSUMPÇÃO; SACEK, 2013), hipótese fortalecida

pela pesquisa geofísica conduzida por FENG *et al.* (2007) que aponta para alterações na velocidade das ondas sísmicas em diversas profundidades do manto, sugerindo a possibilidade do afinamento litosférico na região do Pantanal. A Figura 19 espelha a espessura crustal do Brasil. As observações de Hamsa e Muñoz em 1996, que mostram ser o fluxo de calor geotérmico maior na região do que nas áreas adjacentes, favorecem a tese do adelgaçamento litosférico (ASSINE, 2012, em Geologia do Brasil pag 622/906).

Os maiores tremores registrados no espaço Pantaneiro foram o sismo de 1964 em Miranda, com 5.4 de magnitude e o sismo de 2009 em Coxim, de magnitude 4.8 (DIAS *et al.*, 2015), ambos associados a falhas inversas, o que evidencia a existência de esforços compressivos, indicando a ocorrência de modificações do regime de esforços, uma vez que as falhas normais podem estar passando por esforços transpressivos/compressivos (FACINCANI, 2011).

Observa-se uma grande carência de informações a respeito do embasamento no Pantanal, tendo como escassa informação o mapeamento realizado na década de 70, a partir dos poços perfurados pela Petrobras na década anterior e que mostram uma depressão da ordem de 500 m no interior da bacia, recoberta por sedimentos, conforme o mapa apresentado na Figura 15 onde estão traçadas as isópacas desta singularidade (Assine *et al.*, 2015) e a correspondência no perfil topográfico.

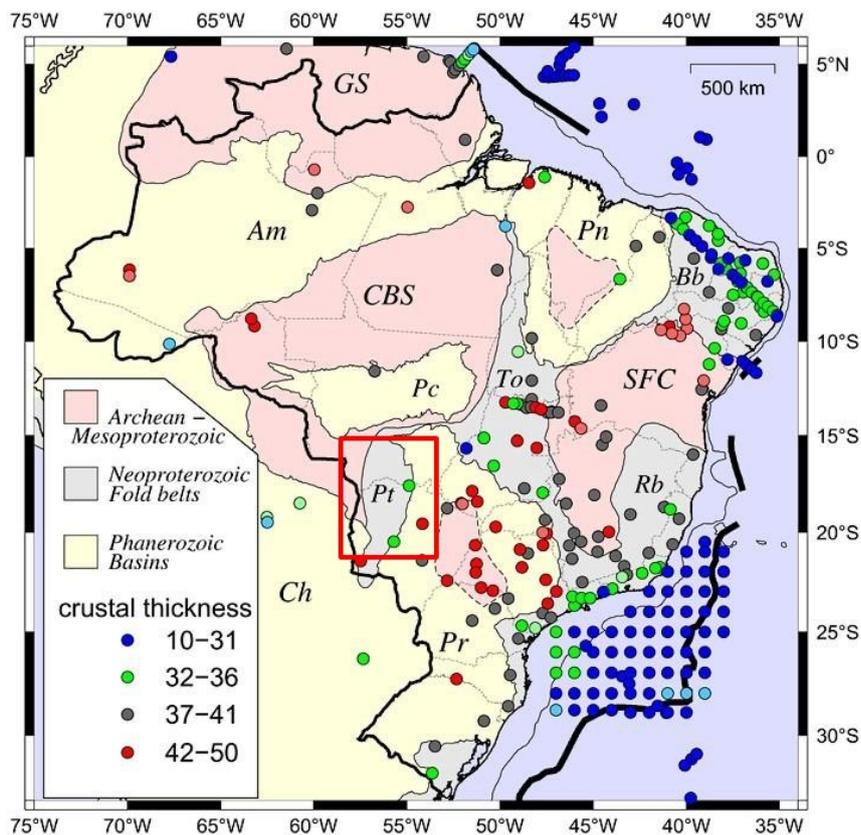
Pode-se esquematizar a Bacia Sedimentar do Pantanal conforme a Figura 20, expondo as falhas do embasamento, delineando os megafans do rio Taquari e rio São Lourenço, com os divisores rio Negro e rio Piquiri em paralelo, desaguando no coletor rio Paraguai e cercados pelo plateau de Maracaju à direita e pelo maciço do Urucum e serra do Amolar à esquerda, mostrando o confinamento oriental das grandes drenagens.

Figura 17: Mapa de Áreas Sismogênicas do Brasil segundo o geólogo norte-americano Branner em 1912.



Fonte: Branner (1912).

Figura 18: Espessura crustal do Brasil, ressaltando, em vermelho, a região do Pantanal. Círculos cinzentos indicam espessura normal entre 36.5 e 41.5 km, vermelhos anunciam espessura de crosta maior do que 41.5 km e círculos azuis denotam espessuras crustais inferiores a 31.5 km. Observa-se que o Pantanal está apresentando espessura entre 31.5 e 36.5.



Fonte: Assumpção et al., 2013

5 METODOLOGIA

5.1 Definição Da Área De Estudo

5.1.1 Área De Responsabilidade

É a área de interesse deste trabalho, onde será aplicada a metodologia probabilística para o mapeamento do perigo sísmico. A presente área de responsabilidade é a Bacia Sedimentar do Pantanal, posicionada na porção central do continente Sul-americano, entre as coordenadas 15°32'19"S ao norte, 22°8'12"S ao sul, 54°54'34"O a leste e 59°21'6"O a oeste. Foi utilizado um shapefile da Bacia do Pantanal extraído da Base Cartográfica Comum, IBGE, escala 1:250.000, editado pelo Modelo Digital de Elevação do SRTM-Shuttle Radar Topography Mission(2000).

5.1.2 Área De Influência

Área onde se assume que a atividade sísmica influencia o perigo sísmico na área de responsabilidade. No presente estudo, é considerada uma área envolvente e distanciada em 200km do limite externo da bacia que chamaremos de envoltória.

5.2 Fontes De Informação Bibliográfica

Foram selecionadas informações de publicações referentes à compreensão do tema e conhecimento da área focalizada, estando referenciadas na Bibliografia.

5.3 Fontes De Dados Sísmicos

A metodologia probabilística foi aplicada sobre dados do Catálogo Sísmico Brasileiro (CBS), elaborado e publicado pelo IAG/USP em 11 de julho de 2017, com 1719 sismos históricos e instrumentais do Brasil e adjacência próxima, datados de 1724 a 2017, dos quais foram escolhidos, após declusterização, 54 eventos localizados no Centro-Oeste e interiores à envoltória. Por aderência geoestatística foi escolhido um sismo inédito do trabalho de SILVA(2017). No Anexo 1 é apresentada a tabela filtrada dos sismos com sua localização, magnitude e data. A completeza dos registros foi aferida parcialmente pelo método cumulativo visual proposto em 1985 por Mulargia e

Tinti(AHMAD,2016), pois a escassez de dados não permite uma visualização satisfatória da relação linear entre a distribuição cumulativa dos eventos e seu respectivo intervalo de tempo.

5.4 Tecnologia Utilizada

5.4.1 R-CRISIS 2018

Desenvolvido pelo Instituto de Engenharia da Universidade Nacional do México (UNAM), por Ordaz, Aguilar e Arboleda, (2007) para executar o PSHA, Análise Probabilística da Ameaça Sísmica segundo Cornell(1968), com interface gráfica, possibilidade de escolha de fontes sismogênicas com diversos formatos e dimensões, cálculo de excedência de PGA com vários panoramas de frequência, cálculo de desagregação, cálculo de aceleração espectral, entre outros recursos, como geração e exportação de imagens, gráficos e relatórios.

5.4.2 QGIS (Quantum GIS, Open Source Geographic Information System)

Utilizado na elaboração de mapas temáticos e análises espaciais, é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) com código-fonte aberto, multiplataforma, que permite a visualização, edição, armazenamento, análise e publicação de dados georreferenciados. Projeto oficial da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), sob licença GNU-General Public License.

5.4.3 Weichert Script Linux

Algoritmo de máxima verossimilhança para determinação da reta de ajuste da fórmula de Gutenberg-Richter e seus parâmetros a e b , para intervalos desiguais de tempo com incrementos distintos de magnitude, denominado ‘Estimation of beta by maximum likelihood for variable observation periods for different magnitude increments’.

5.4.4 Suíte Libre Office

Suíte livre para escritório, multiplataforma, onde foram usados o editor e gerador de texto Write, a planilha de cálculos Calc, o editor e gerador de fórmulas matemáticas Math e o editor e gerador de apresentações Impress.

5.5 Elaboração Do PSHA

5.5.1 Escolha das Fontes Sísmicas

As fontes sísmicas foram idealizadas como áreas sísmicas, visto não haver delineamentos claros de convergência espacial dos sismos às falhas já conhecidas no Pantanal. Optou-se, pela geometria de polígonos convexos envolvendo agrupamentos de sismos classificados por proximidade espacial, por minimizar a área e maximizar o resultado probabilístico dos parâmetros sísmicos, numa abordagem a favor da segurança. Foi utilizado um complemento de clusterização do Qgis para a operação de agrupamento dos sismos, cujo resultado foi reconfigurado segundo as características geográficas do Pantanal.

5.5.2 Dedução Dos Parâmetros Dos Modelos De Recorrência

Conforme os dados de entrada do software CRISIS, o modelo de recorrência escolhido é o de Gutenberg-Richter, que é o modelo mais utilizado universalmente, para o qual foram determinados os parâmetros a , b , β e λ , pelo script de Weichert, segundo as equações (15) e (16).

Onde:

λ_i é a taxa de acumulação de sismos com magnitudes maiores do que M_i

$$\log(\lambda_i) = a + (b * M_i) \quad (\text{Relação de Gutenberg-Richter}) \quad (15)$$

$$\beta = b * \ln(10) \quad (16)$$

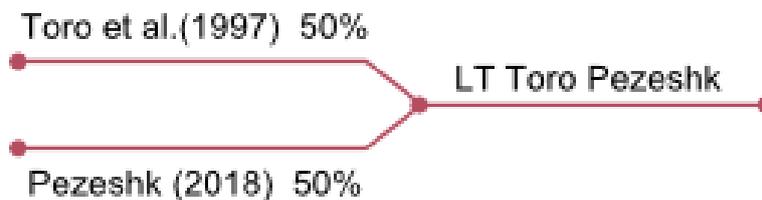
Valores que serão utilizados pelo software para calcular a distribuição da probabilidade de ocorrência de magnitudes para aplicação na fórmula (11), (12), (13) ou (14) ($P(M)$).

5.5.3 Seleção Das Equações De Atenuação

Foram selecionados dois modelos de atenuação, ambos baseados em relações empíricas medidas no Centro e Centro-Oeste dos Estados Unidos, em região continental, intraplaca e estável, semelhante às condições brasileiras. O primeiro modelo é o de Toro, Abrahamson e Schneider de 1997 e o segundo é de Pezeschk, Zandieh, Campbell e Tavakoli, de 2018, ambos para atenuação

em rocha. Foram utilizados independentemente e em Árvore Lógica ou Logical Tree, numa composição equivalente conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 21: Logical Tree ou Árvore Lógica de composição equivalente dos modelos de atenuação de Toro(1997) e de Pezeshk(2018).



Fonte: a própria autora.

5.5.4 Processamento Dos Valores E Mapas De Perigo Sísmico

O software R-CRISIS, alimentado com os dados do modelo de recorrência, período de utilização, probabilidade de excedência, frequência sísmica e modelo de atenuação, calcula os valores pontuais de aceleração, em toda a área de responsabilidade, gerando matrizes de valores que possibilitarão construir as curvas de perigo sísmico, as curvas de resposta espectral, assim como, inseridas num Sistema de Informações Geográficas, resultarão na confecção dos mapas de perigo sísmico.

Na apropriação das fontes sísmicas foram considerados:

- Agrupamentos limitados por poligonais convexas, a favor da segurança, por apresentarem área menor do que as poligonais retangulares.
- Profundidade hipocentral média de 5km.
- Ruptura circular como origem do sismo.
- K_1 e K_2 , de Wells & Coppersmith, valores sugeridos pelos autores para aplicação em falhas normais, inversas e transcorrentes. Os índices K_1 e K_2 relacionam a área de ruptura com a magnitude do sismo.
- Ordenadas espectrais, distribuídas de 0.01s a 1s, na seguinte sucessão: 0.01s, 0.02s, 0.04s, 0.06s, 0.08s, 0.1s, 0.2s, 0.4s, 0.6s, 0.8s e 1s, correspondentes às frequências: 100hz, 50hz, 25hz, 16.7hz, 12.5hz, 10hz, 5hz, 2.5hz, 1.67hz, 1.25hz, 1hz.

Buscou-se harmonia com os espectros de resposta habituais para edificações até aproximadamente 10 andares e com o panorama de pequenos sismos com ação proximal, resultando em frequências maiores para o cálculo das ações e reações espectrais.

- Os modelos de atenuação utilizados acolheram somente o valor médio da aceleração, desprezando o espalhamento em virtude de limitações de processamento.

5.5.5 Mapas De Perigo Sísmico

As superfícies de aceleração foram geradas a partir de um raster de elevação, com auxílio de um Sistema de Informações Geográficas através da interpolação das cotas de aceleração por um algoritmo denominado “Natural Neighbor”, com superfície final suavizada por estatística focal. Os mapas temáticos foram conformizados numa só escala de cores e valores representados com dispensa de elementos geográficos como escala, informações de Projeção Geográfica e Datum, para maior limpidez e compreensão. Porém todos os mapeamentos compartilham as características:

- Sistema de Coordenadas WGS 1984 UTM Zona 21S
- Projeção: Transversa de Mercator
- Datum: WGS 1984
- Falso Leste, Falso Norte: 500.000, 10.000.000
- Meridiano Central: -057
- Fator de escala: 0,9996
- Latitude de Origem: 0,0
- Unidade: Metro
- Escalas de 1:3.000.000
- Grática de referência em graus

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados estão exibidos em 3 itens, sendo o primeiro destinado aos mapeamentos auxiliares, o segundo a exposição das curvas de resposta espectral e curvas de perigo sísmico e o terceiro a apresentação do Mapa de Perigo Sísmico da Bacia Sedimentar do Pantanal, escolhido para a frequência de 10hz ou período de 0.1s, período de utilização de 50 anos e modelo de atenuação sendo a Árvore Lógica de composição dos modelos de Toro e Pezeshk.

6.1 Mapeamento Do Perigo Sísmico Na Bacia Sedimentar Do Pantanal

O mapeamento do Perigo Sísmico é composto de:

- Mapas auxiliares, que são a distribuição espacial de todos os sismos, ilustrada no mapa da Figura 22 e as fontes sísmicas com respectivas distribuições individualizadas estampadas no mapa da figura 23.

- Mapas de perigo sísmico , representando as acelerações obtidas para a frequência de 10hz ou período de onda de 0.1s, em dois modelos de atenuação, Pezeshk(2018) e Toro(1997) e sua composição equivalente na Árvore Lógica, ou Logical Tree. Vide Figura 24.

6.1.1 Mapa Da Distribuição Espacial De Todos Os Sismos

É a representação georeferenciada dos eventos sísmicos, onde as magnitudes e datas de ocorrência entram como atributos de cada lançamento. Vide Figura 22.

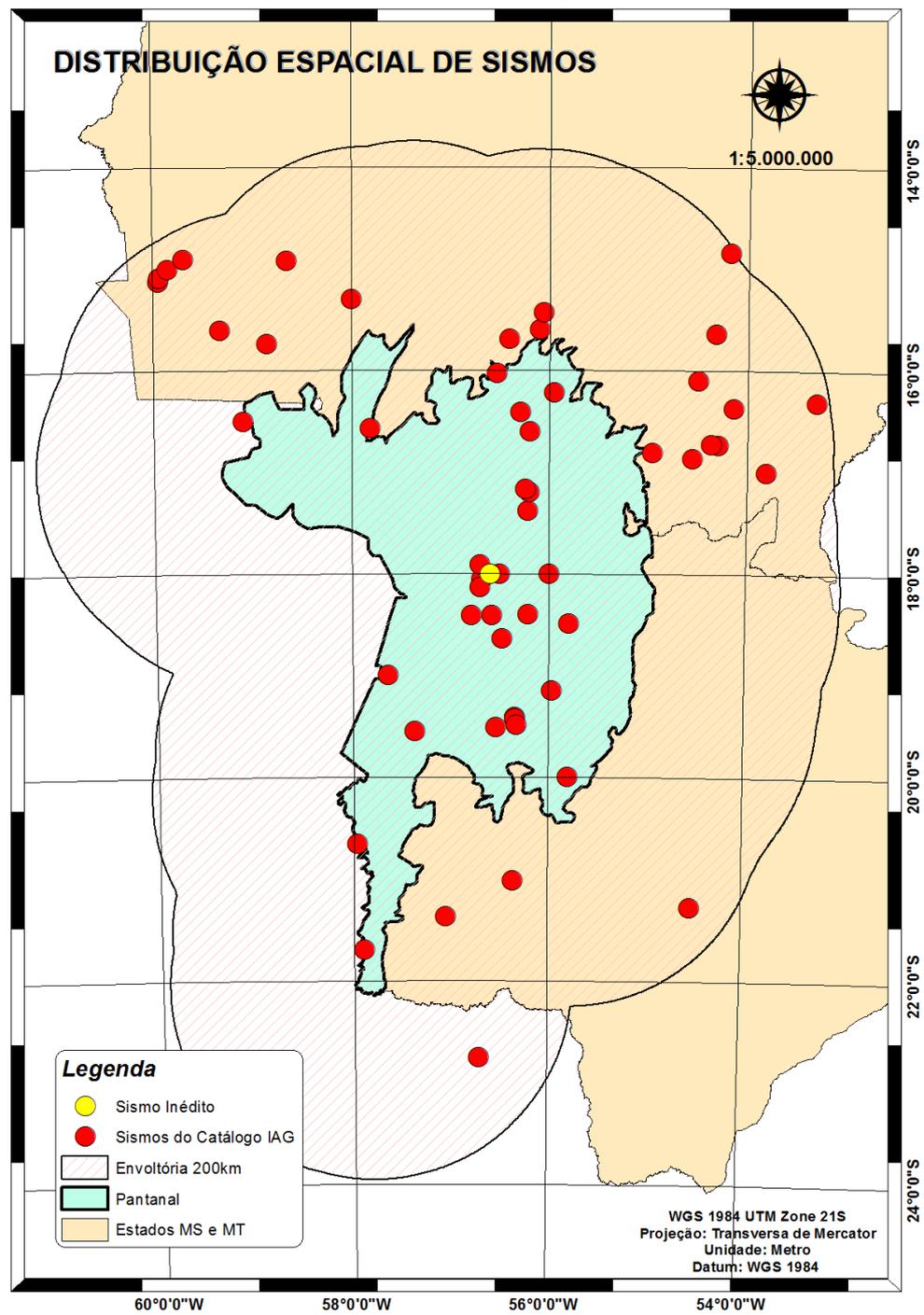
6.1.2 Mapa Das Fontes Sísmicas

As fontes sísmicas foram estruturadas em concordância com os agrupamentos espaciais de sismos ou clusters, com destaque para a fonte número 2, com maior população de sismos, com maiores magnitudes e clusterização pronunciada. As fontes número 1 e número 3 representam agrupamentos de menor relevância no processamento, pela quantidade e baixa magnitude dos sismos porém demonstram uma clara clusterização; a fonte número 4 é considerada um agrupamento apenas. Vide Figura 23.

6.1.3 Mapas De Perigo Sísmico Da BSP

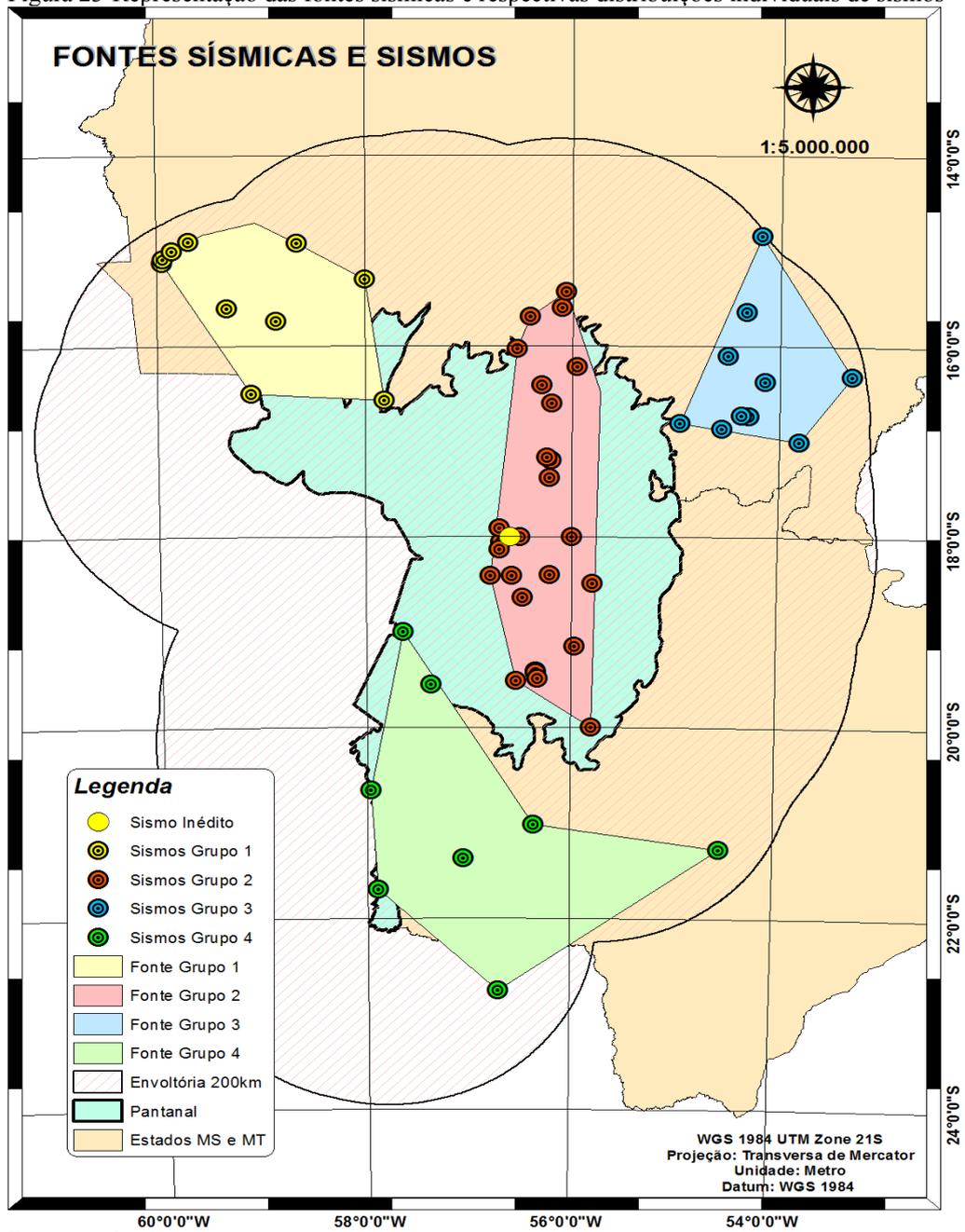
São apresentados três mapas, representados nas Figuras 24, 25 e 26, correspondentes à utilização dos dois modelos de atenuação, Pezeshk(2018) e Toro(1997), e da sua árvore lógica, aplicados no processamento das 4 fontes sísmicas, com probabilidade uniforme mas independente de evento sísmico em cada uma, resultando, no ponto observado, na soma dos valores obtidos no processamento de cada fonte. Estes processamentos seguiram as recomendações da NBR quanto ao período de utilização de 50 anos e excedência de 10%.

Figura 22-Distribuição espacial de sismos consoante Apêndice 01



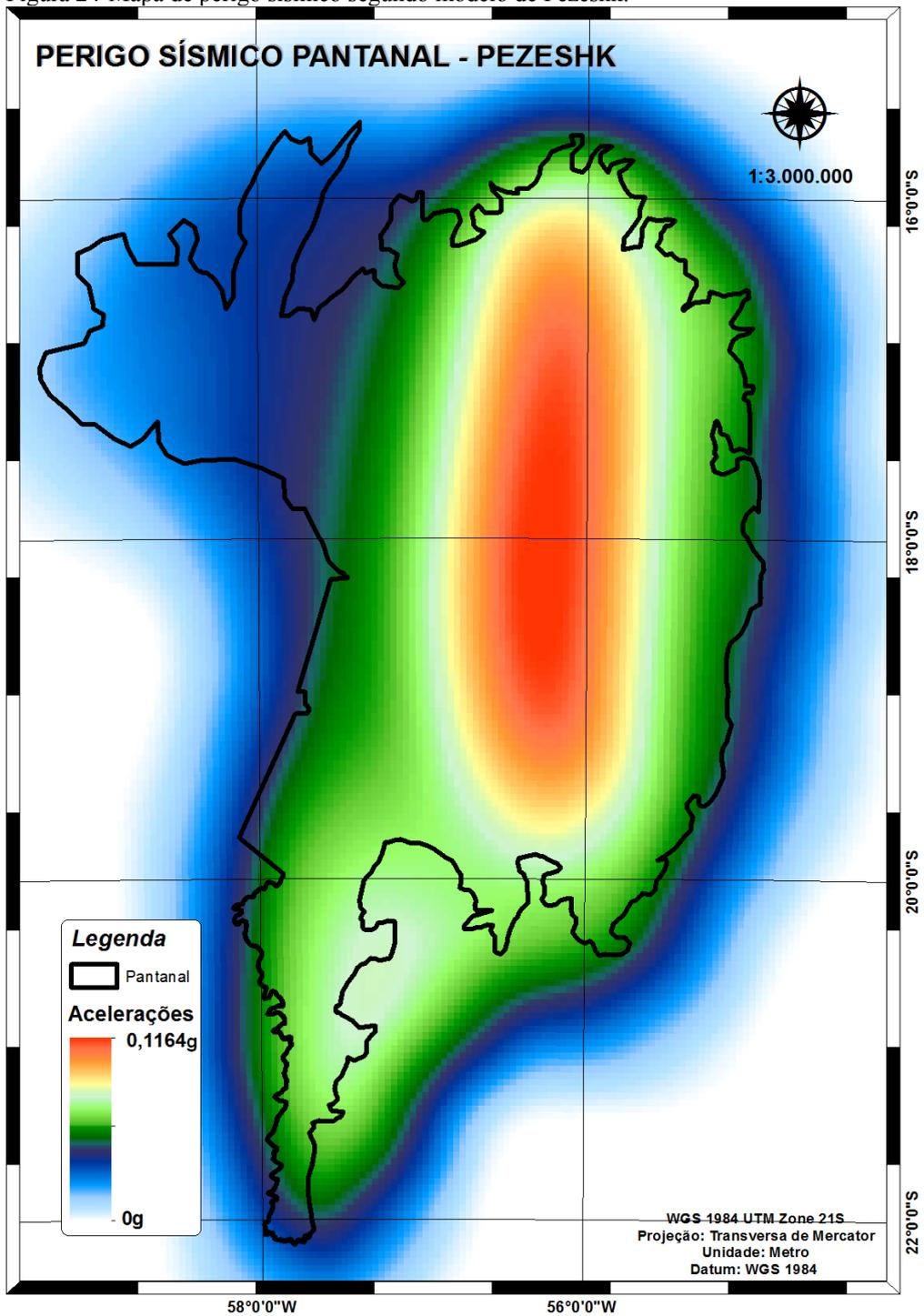
Fonte: a própria autora

Figura 23-Representação das fontes sísmicas e respectivas distribuições individuais de sismos



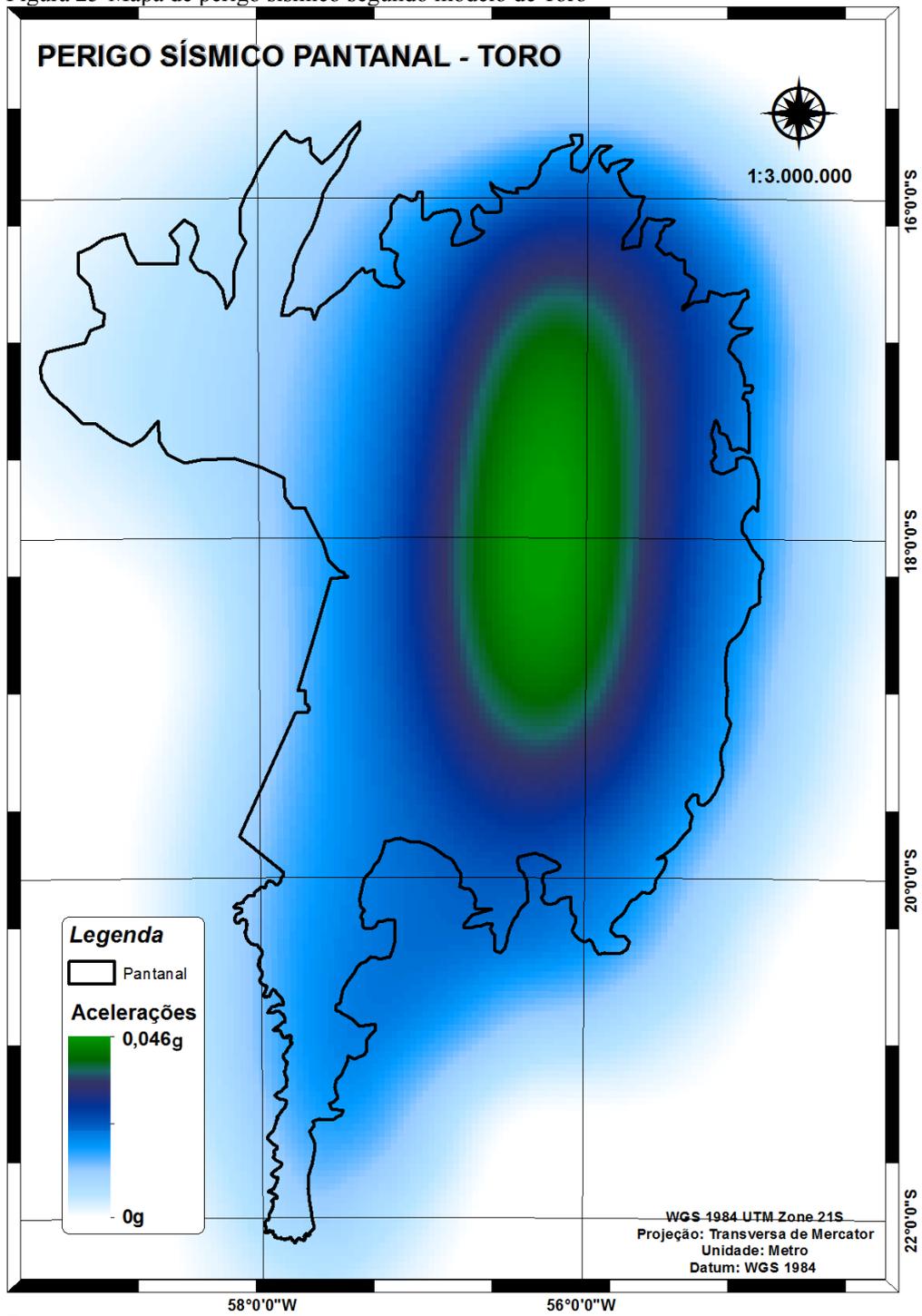
Fonte: a própria autora.

Figura 24-Mapa de perigo sísmico segundo modelo de Pezeshk.



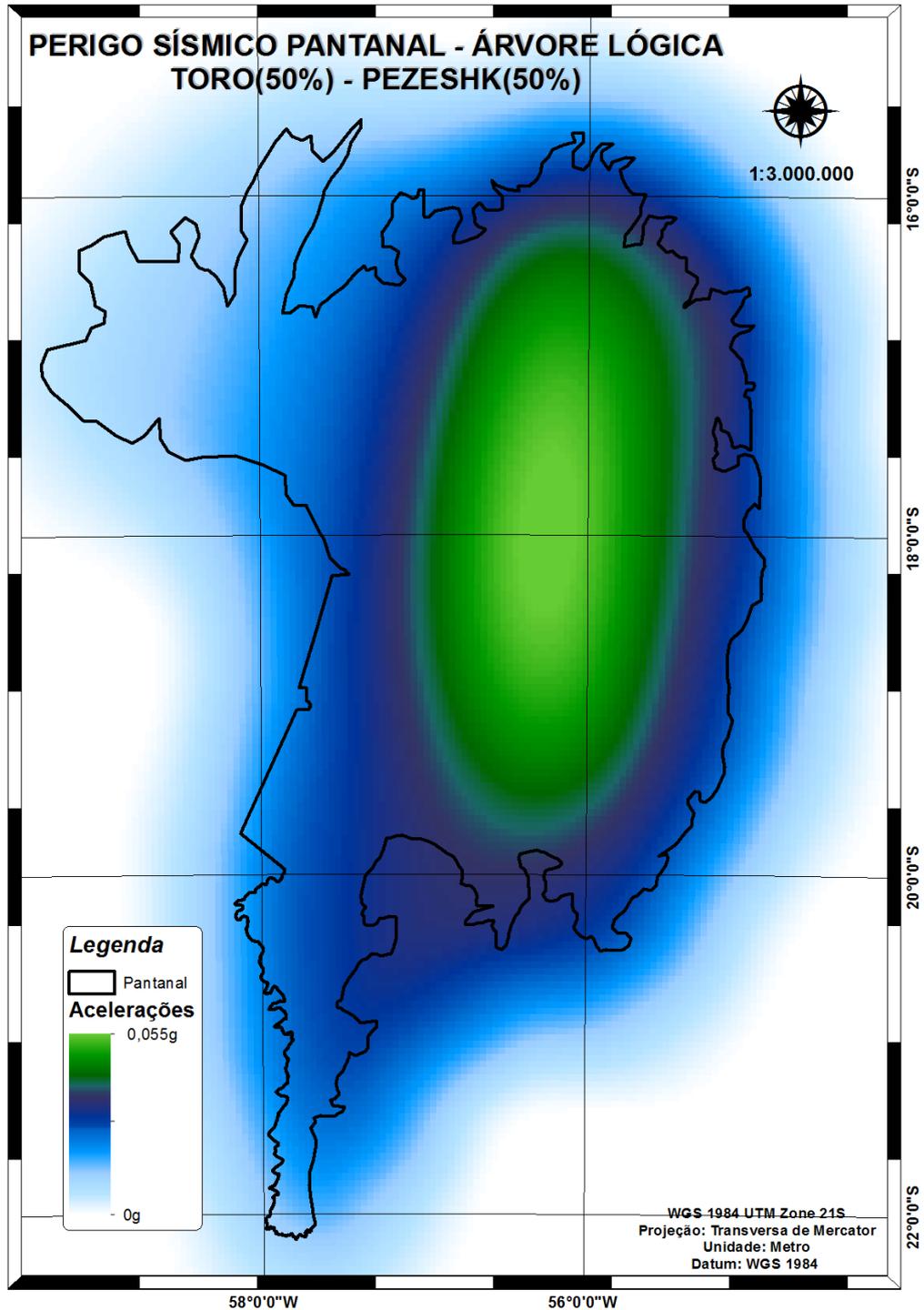
Fonte: a própria autora.

Figura 25-Mapa de perigo sísmico segundo modelo de Toro



Fonte: a própria autora.

Figura 26-Mapa de perigo sísmico segundo modelo composto pela Árvore Lógica Pezeshk e Toro.



Fonte: a própria autora.

6.2 Curvas De Perigo Sísmico E Curvas Espectrais.

Para a elaboração das curvas de perigo sísmico e curvas espectrais foram escolhidas 3 cidades e um ponto genérico na região central do Pantanal, ponto este adentrado nas áreas de máximos de aceleração sísmica, denominado “**Central**”, de coordenadas **-56.19N e -18.13E**.

As cidades são:

- **Cuiabá**, localizada na borda do extremo norte do Pantanal, com população estimada de 607.153 habitantes em 2018 (IBGE). Coordenadas: **-56.08E, -15.6N**.
- **Barão de Melgaço**, localizada na área de máximos de aceleração, na borda norte do Pantanal, ao sul e próximo de Cuiabá, com população estimada de 8.563 pessoas em 2018 (IBGE). Coordenadas: **-55.97E, -16.2N**.
- **Aquidauana**, localizada na borda do extremo sul do Pantanal, com população estimada de 47.784 habitantes em 2018 (IBGE). Coordenadas: **-55.79E, -20.47N**.

O critério adotado foi populacional para Cuiabá, proximidade da área de maiores acelerações para Barão de Melgaço, conhecimento do entorno próximo, no caso de Aquidauana e proximidade ou inclusão na zona de maiores acelerações prováveis no caso de Central. Verificou-se que Barão de Melgaço é a cidade que apresenta maiores acelerações para a probabilidade de 10% em 50 anos.

6.2.1 Curvas Espectrais

As curvas espectrais correlacionam a aceleração em função do período ou frequência de onda, grandezas que guardam entre si a relação de inversão. Assim, num determinado intervalo de tempo de utilização, haverá uma só aceleração para cada período ou frequência escolhida. Na elaboração das curvas de resposta espectral foi utilizado o período de utilização de 50 anos, a probabilidade de excedência de 10% e a gama de frequências percorridas no item 6.1. São representadas num gráfico cartesiano onde a aceleração é função da variação dos valores de frequência, conforme Figura 27.

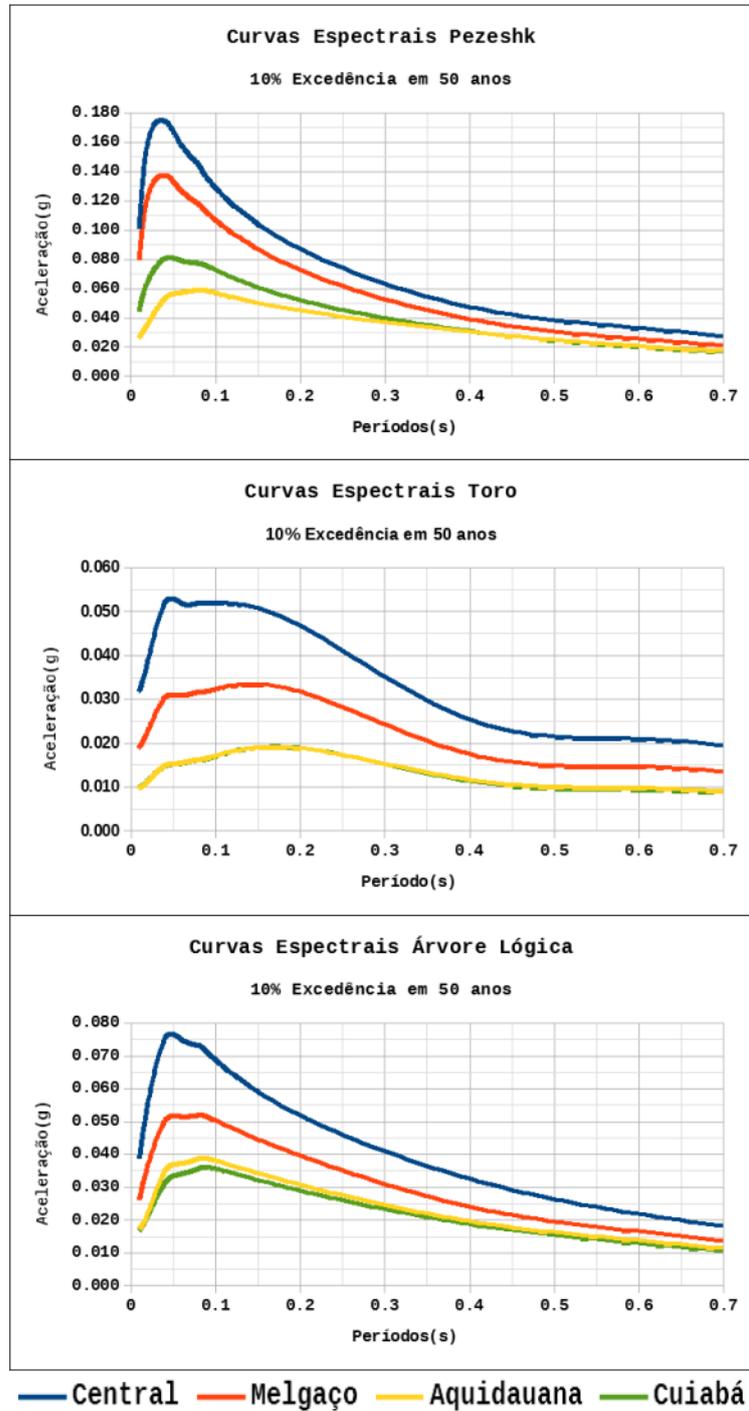
6.2.2 Curvas De Perigo Sísmico

Curvas de perigo sísmico para os pontos observados representam a probabilidade de excedência de uma aceleração, para a frequência de 10hz, com probabilidade de 10% em 50 anos. É o resultado direto da aplicação das equações 10, 11 e 12 do item 3.9.1.5. Significam, num ponto, a correlação entre um valor de aceleração e a probabilidade de excedência que este valor tem. Para sua construção são lançados em gráfico cartesiano as probabilidades de excedência em função da variação dos valores de aceleração, conforme Figura 28, onde cada curva corresponde a um local.

6.3 Mapa De Perigo Sísmico Da Bacia Sedimentar Do Pantanal.

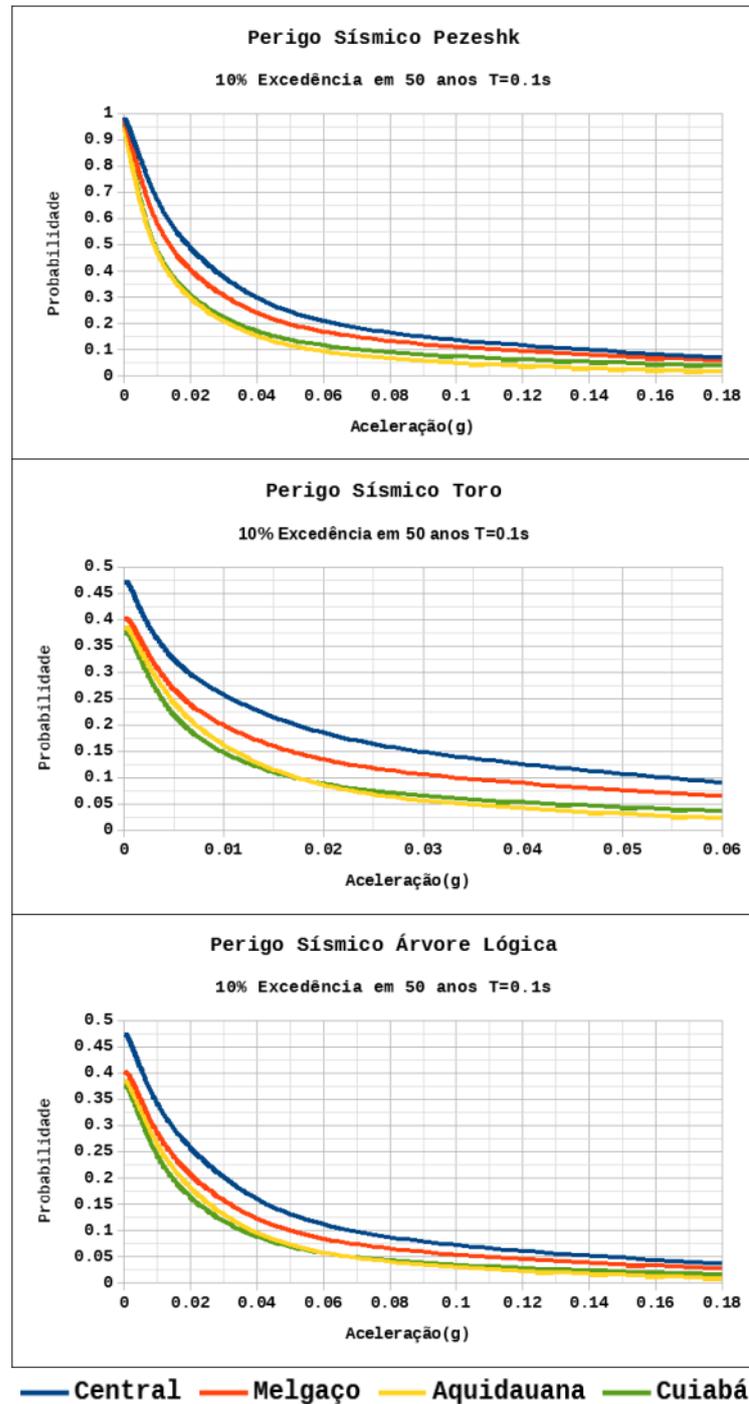
O modelo de atenuação composto por Toro e Pezeshk em árvore lógica foi escolhido como representativo da metodologia de Cornell no Pantanal por proporcionar um resultado nem tão ousado como o advindo do processamento com o modelo de Pezeshk, mas nem tão tímido ou conservador como o procedente do processamento com o modelo de Toro. Para sua confecção buscou-se a adequação das cores com classificação discretizada da aceleração, para facilitar a observação e compreensão do contexto gráfico. Vide Figura 29.

Figura 27-Curvas espectrais para as localidades de Barão de Melgaço, Cuiabá, Aquidauana e o ponto genérico Central, representados por cores distintas, segundo os modelos de atenuação de Pezeshk(topo), Toro(meio) e sua composição equipolente pela Árvore Lógica



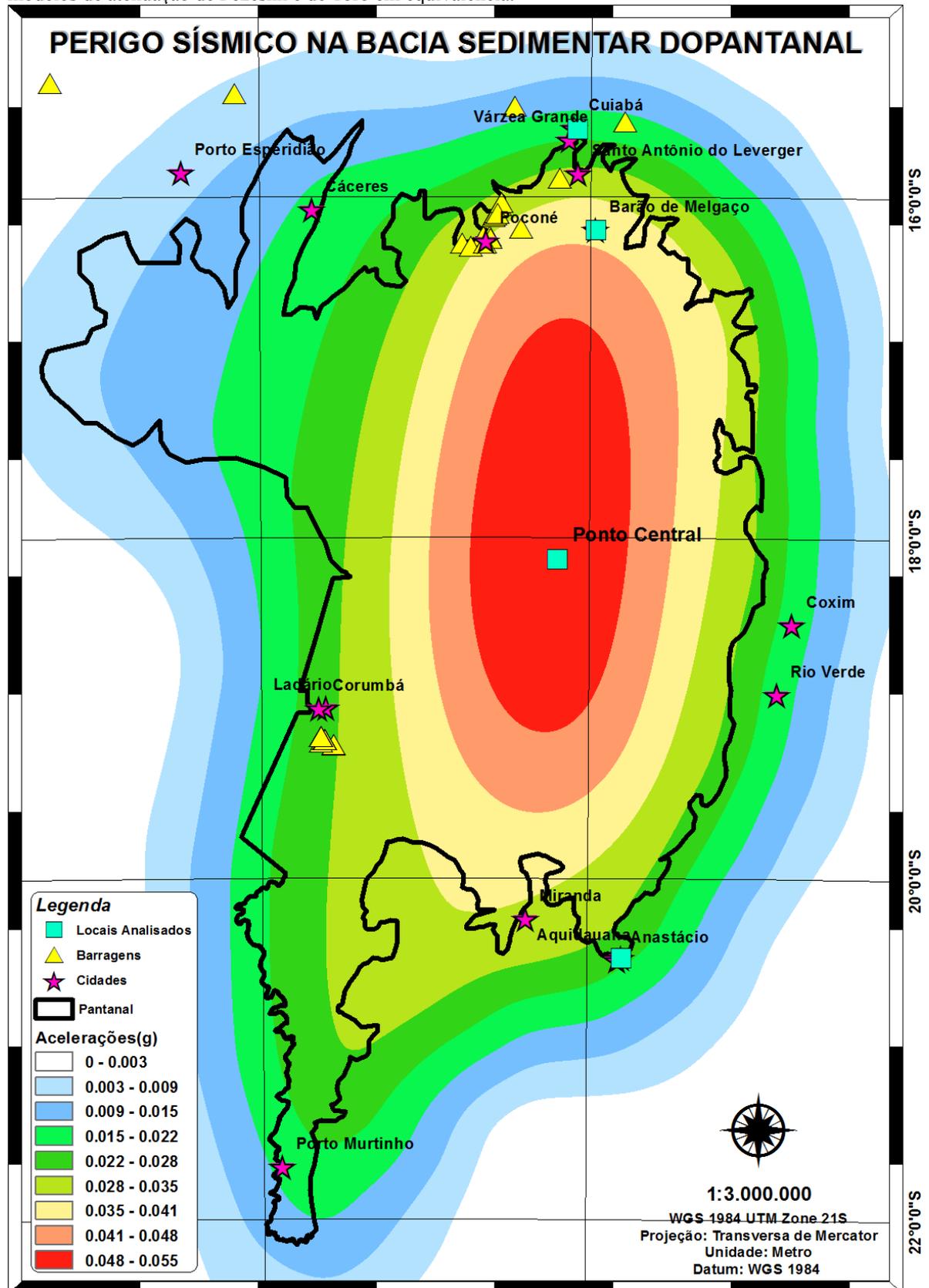
Fonte: a própria autora.

Figura 28-Curvas de perigo sísmico para as cidades de Barão de Melgaço, Cuiabá, Aquidauana e ponto genérico Central, representados em cores distintas, nos modelos de Pezeshk(topo), Toro(meio) e composição equipolente de ambos pela Árvore Lógica.



Fonte: a própria autora.

Figura 29-Mapa de Perigo Sísmico da Bacia Sedimentar do Pantanal segundo Árvore Lógica composta pelos modelos de atenuação de Pezeshk e de Toro em equivalência.



Fonte: a própria autora.

7 CONCLUSÕES

As conclusões vão brindar respostas às questões levantadas no item Objetivos, agregando informações de relevância à compreensão do tema.

7.1 Mapa De Perigo Sísmico

Objetivo: *“Utilizar a metodologia probabilística de Cornell de análise sísmica: Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), para calcular e representar em mapa temático a probabilidade de excedência (10%) das acelerações de pico no solo, oriundas da atividade sísmica no Pantanal e entorno, denominadas PGA (Peak Ground Aceleration), para um determinado período (50 anos)”*.

- Foi escolhida a representação resultante dos cálculos efetuados com o modelo composto de Pezeshk e Toro pela Árvore Lógica, por equilibrar os resultados mais elevados computados pelo modelo de Pezeshk, com os valores mais suaves obtidos pelo modelo de Toro. A média de valores de aceleração obtida na intersecção da área de responsabilidade sobre a área sísmica do Mapa de Ameaça Sísmica do Brasil, indica uma aceleração de 0.0232g, com variância de 0,0155g, valor máximo de 0.0546g e valor mínimo de 0g. A mesma área no Mapa de Ameaça Sísmica do Brasil indica leitura próxima de 15cm/s², equivalente a 0.0153g. Na elipse de maiores acelerações o valor da NBR 15421, 0.025g é extrapolado. Os valores regionalizados foram superiores aos da Norma Brasileira e do Mapa de Ameaça Sísmica do Brasil.
- O maior perigo sísmico é observado na área central da bacia, indicando valores de aceleração que variam entre 4,8% a 5,5% da gravidade.
- As isolinhas da crista de aceleração se apresentam em formato elipsoidal, com orientação N/S tendendo a NE/SO.
- Dos quatro locais observados destaca-se o ponto Central, situado na área de maior perigo sísmico, e a cidade de Barão de Melgaço que se situa numa faixa de acelerações que varia de 3,5% a 4,1% da gravidade. A distribuição das cidades pantaneiras e peri pantaneiras segundo sua exposição ao perigo sísmico está na Tabela 2.
- As cidades de Barão de Melgaço e Poconé são as mais expostas ao Perigo Sísmico, com 10% de probabilidade, em 50 anos, para a frequência de 10hz, da aceleração de

0,041g ou 4,1% da gravidade ser excedida, o que corresponderia à intensidade VI na escala Mercalli.

Tabela 2-Perigo sísmico nas cidades pantaneiras e peri pantaneiras com respectiva população.

Cidade	Lat	Long	Nível	Aceleração Mínima(g)	Aceleração Máxima(g)	População(h)
Barão de Melgaço	-55.97	-16.20	6	0.035	0.041	8563
Poconé	-56.63	-16.26	6	0.035	0.041	32768
Santo Antônio do Leverger	-56.08	-15.86	5	0.028	0.035	16433
Miranda	-56.38	-20.24	5	0.028	0.035	27795
Ladário	-57.60	-19.01	4	0.022	0.028	22968
Corumbá	-57.65	-19.01	4	0.022	0.028	110806
Aquidauana	-55.79	-20.47	4	0.022	0.028	47784
Anastácio	-55.81	-20.48	4	0.022	0.028	25128
Cuiabá	-56.10	-15.60	3	0.015	0.022	607153
Várzea Grande	-56.13	-15.67	3	0.015	0.022	282009
Cáceres	-57.68	-16.08	3	0.015	0.022	93882
Coxim	-54.76	-18.51	3	0.015	0.022	33516
Rio Verde	-54.84	-18.92	3	0.015	0.022	19682
Porto Murtinho	-57.88	-21.70	3	0.015	0.022	17078
Porto Esperidião	-58.46	-15.86	1	0.003	0.009	11935

Fonte: a própria autora, com dados adicionais de população do IBGE, estimativa de 2018.

- Constata-se a presença de 36 barragens de rejeitos de minérios, sendo 17 em Mato Grosso do Sul, numa região com acelerações variando de 0,022g a 0,028g e 14 em Mato Grosso, e 19 em Mato Grosso, das quais 4 em área de acelerações entre 0,035g e 0,041g e 10 barragens em áreas de acelerações entre 0,028g e 0,035g, valores superiores aos sugeridos pela Norma Técnica Brasileira NBR 15421.

7.2 Curvas De Perigo Sísmico E Curvas Espectrais

Objetivo: “ *Determinar e representar graficamente as curvas de perigo sísmico e de resposta espectral de três cidades e de um ponto genérico no Pantanal* “.

- A Figura 28 apresenta os gráficos das curvas de perigo sísmico para os 4 locais, nos modelos de Pezeshk, Toro e a combinação em Árvore Lógica equivalente dos modelos de Pezeshk e Toro. Observa-se que as curvas de perigo para o ponto Central e para Barão de Melgaço se localizam no topo das curvas, indicando que nestes locais, uma aceleração terá maiores probabilidades de ocorrência. Ou, dada uma probabilidade, nestes locais as acelerações

correspondentes serão maiores. O modelo de Pezeshk produz os maiores resultados.

- A Figura 27, mostra o espectro de acelerações para os 4 locais, nos modelos de Pezeshk, Toro e a combinação em Árvore Lógica equivalente dos modelos de Pezeshk e Toro. Observa-se que as acelerações máximas são obtidas nas localidades Central e Barão de Melgaço, nos 3 modelos, com maiores resultados na utilização do modelo de atenuação de Pezeshk. Os períodos de máxima aceleração se localizam abaixo de 0,1 s nos modelos de Pezeshk e Árvore Lógica, e abaixo de 0,2 s na equação de Toro, sendo menores para os locais mais próximos no núcleo do perigo sísmico em mapa.

7.3 Contribuição Para A Norma Brasileira ABNT NBR-15421

Objetivo: *“Contribuir para o aprimoramento da Norma Brasileira ABNT NBR-15421 Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos-Procedimentos, editada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ajustando valores de acelerações máximas na região do Pantanal”.*

- As acelerações sísmicas obtidas são maiores do que os valores recomendados pela NBR 15421, o que implica em maiores cuidados no dimensionamento estrutural, a favor da segurança, buscando comparar as soluções da Norma Técnica com resultados extraídos da metodologia probabilística. A constatação de valores díspares das recomendações de cálculo da NBR já é assinalada pelo Mapa de Ameaça Sísmica(Dourado,2014), onde valores discrepantes e muito superiores ao indicado na norma se manifestam na região de Porto dos Gaúchos – MT, sendo verificados valores que atingem 0.056g numa região onde a Norma recomenda 0.025g.
- Os resultados obtidos neste trabalho extrapolam os resultados do Mapa de Ameaça Sísmica do Brasil, o que pode ser entendido pela fórmula do PSHA, no fator de probabilidade de distâncias, considerando-se a distribuição espacial dos sismos numa área menor. Pelo enfoque Bayesiano utilizado na confecção da Metodologia de Cornell, a probabilidade de distribuição espacial, ou a probabilidade relacionada ao espalhamento dos sismos numa área, influi nos

seus resultados, incrementando os valores regionalizados, distinguindo-os para acima da média.

7.4 Considerações Finais

Agumas reflexões para o projetista estrutural e para o analista sísmico, a favor da segurança de cálculo:

- Os valores regionais de aceleração sísmica devem ser aquilatados probabilisticamente, sobretudo em regiões de algum histórico sísmico, antes da assunção de medidas conservadoras, que conduzem a soluções menos onerosas mas que expõem a obra ou empreendimento ao perigo sísmico, com possibilidade de gerar custos de remediação elevados e inesperados. Este trabalho aponta valores regionais mais elevados, que implicam, para alguns lugares como Barão de Melgaço ou Poconé, na necessidade de um estudo mais detalhado e crítico ao se assumir um quadro de esforços sísmicos no cálculo estrutural de uma edificação ou máquina. A Análise Probabilística de Risco Sísmico ou PSHA deve ser imprescindível no dimensionamento de obras como barragens de terra para contenção de água ou de rejeitos de minério em qualquer local do território brasileiro, assim como deve ser incorporada também aos cálculos para edificações residenciais baixas e de material friável, vulneráveis às maiores frequências por terem períodos naturais menores, os quais verificamos serem, na região, os períodos de maior valor de aceleração, conforme Figura 27.
- Embora libere o projetista para buscar outras fontes de orientação para o projeto sismo resistente, (NBR 15421 página 6), a Norma ABNT NBR-15421, deve ser revista, para aportar o conhecimento presente da sismicidade no território nacional adquirido pela Sismologia Brasileira, desde a sua publicação em 2006. Os avanços no conhecimento geofísico do Brasil impõem uma revisão objetivando adequar a NBR 15421 a uma realidade menos conservadora em termos de sismicidade, gerando novos critérios para estabelecimento de esforços e novos procedimentos de cálculo, levando em conta uma realidade mais ativa de ações geotécnicas provenientes dos sismos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N. O Pantanal Mato-Grossense e a teoria dos refúgios. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 50, n. 2, p. 9-57, 1988. Disponível em: Acesso em 14 jul. 2017.

ABNT, NBR. 15421: 2006–Projeto de estruturas resistentes a sismos–Procedimento. 2006.

AHMAD, Naveed. Steps for Conducting Probabilistic Seismic Hazard Analysis using GIS and CRISIS Tools. Technical report. Novembro 2016

ASSINE, M. L. **Sedimentação na Bacia do Pantanal Mato-Grossense, Centro-Oeste do Brasil**. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Rio Claro, Tese de Livre-Docência, 106p. 2003.

ASSINE, M. L. Pantanal Mato-Grossense: uma paisagem de exceção. **MODENESI-GAUTTIERI, MC; BARTORELLI, A.; MANTESSO-NETO, V. CARNEIRO, CDR & LISBOA, MBAL (eds.). A Obra de Aziz Nacib Ab'Saber. São Paulo, Beca-BALL edições**, p. 464-489, 2010.

ASSINE, M.L.; SOARES, P.C. Quaternary of the Pantanal, west-central Brazil. ***Quaternary International***, 114: 23-34. 2004.

ASSINE, Mario L. et al. Geology and geomorphology of the Pantanal basin. In: **Dynamics of the Pantanal Wetland in South America**. Springer, Cham, 2015. p. 23-50.

ASSUMPÇÃO, Marcelo. A regional magnitude scale for Brazil. **Bulletin of the Seismological Society of America**, v. 73, n. 1, p. 237-246, 1983.

ASSUMPÇÃO, Marcelo et al. Crustal thickness map of Brazil: Data compilation and main features. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 43, p. 74-85, 2013.

ASSUMPÇÃO, Marcelo; NETO, Coriolano M. Dias. Sismicidade e estrutura interna da terra. **Decifrando a terra. São Paulo, Oficina de Textos**, p. 43-62, 2000.

ASSUMPÇÃO, Marcelo; SUÁREZ, Gerardo. Source mechanisms of moderate-size earthquakes and stress orientation in mid-plate South America. **Geophysical Journal**, v. 92, n. 2, p. 253-267, 1988.

ASSUMPÇÃO, M. et al. Intraplate seismicity in Brazil. In: P. Talwani. (Org.). **Intraplate earthquakes**. 1ed. Cambridge. Cambridge University Press, 2014, v. 1, p. 50-71.

ASSUMPÇÃO, M.; FERNANDES, C.M. & FACINCANI, E.M. **O sismo do Pantanal de 15/06/2009 de magnitude 4,8**. 11º Congr. Bras. Geofísica, Salvador, SBGf. 2009.

BLANDÓN, NAR. Dissipação de Energia em Estruturas de Edifícios sob Ação Sísmica. 2003. Tese de Doutorado. Tese D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BRANNER, J. C. Earthquakes in Brazil. **Bulletin of the Seismological Society of America**, v. 2, n. 2, p. 105-117, 1912. ISSN 0037-1106.

BRASIS. Brazilian Seismographic Integrated Systems. **Rede Sismográfica Integrada do Brasil**. (<http://www.sismo.iag.usp.br/sismologia/projetos.php>). Último acesso em 02 de janeiro de 2019.

CATTO, A.J. *Análise geológica e geofísica da Bacia do Pantanal Matogrossense*. Rio de Janeiro: Petrobrás. 23p.(DEPEX/SEDOT 5296). 1975.

CORNELL, C. Allin. Engineering seismic risk analysis. **Bulletin of the seismological society of America**, v. 58, n. 5, p. 1583-1606, 1968.

CRISIS. **Crisis**. Disponível em: <<http://www.r-crisis.com/>>. Acesso em 01 nov. 2017.

DIAS, Fábio L. et al. The 2009 earthquake, magnitude mb 4.8, in the Pantanal Wetlands, west-central Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 88, n. 3, p. 1253-1264, 2016.

DOURADO, J. C. Mapa de Ameaça Sísmica do Brasil. In; Congresso Brasileiro de Geologia, n. 47, 2014. Salvador-BA. **Anais...** Sociedade Brasileira de Geologia, Salvador-BA, 2014.

FACINCANI, E. M. et al. **Sismicidade da Bacia do Pantanal Mato-Grossense**. SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, Campinas - SP. v. 13, p. 314-317, 2011.

FACINCANI, E.M. **Geomorfologia e Geologia do Cenozóico do Médio Vale do Rio Aquidauana, Borda Sudeste da Bacia do Pantanal, MS**. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Rio Claro, Relatório de Pós-Doutorado, 100p. 2007.

FENG, M.; ASSUMPÇÃO, M.; VAN DER LEE, S. Group-velocity tomography and lithospheric S-velocity structure of the South American continent. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 147, n. 4, p. 315-331, 2004. ISSN 0031-9201.

FIORAVANTI, C. O calor que faz o chão tremer: variações na espessura da litosfera causada por diferenças de temperatura esclarece a origem de terremotos no Brasil. **Revista FAPESP**, São Paulo, v. 102, p. 36 – 41, 2004.

FRANÇA, G. & ASSUMPÇÃO, M. Reflexos no Brasil de terremotos distantes. **Ciência Hoje**. Vol. 42. Nº 249. p 20-25. 2008.

HARRAIZ SARACHAGA, M. **Conceptos básicos de Sismología para ingenieros**. 1997.

HASUI, Yociteru et al. (Ed.). **Geologia do Brasil**. Beca, 2012.

HASUI, Y. Neotectônica aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. In: Workshop sobre a Tectônica e Sedimentação Cenozoica Continental no Sudeste Brasileiro. **Anais...** Belo Horizonte: SBG-MG.p 1-31 (Boletim 11). 1990.

IAG/USP. Apostila Introdução à Sismologia. XIV Escola de Verão, 30-Jan a 03-Fev 2012..25p.

IAG. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo (USP). **Tremor de terra na região de Coxim-MS**. (<http://www.sismo.iag.usp.br/sismologia/noticias.php?id=9>). Último acesso em 2 de maio de 2011.

MCGUIRE, Robin K. **Seismic hazard and risk analysis**. Earthquake Engineering Research Institute, 2004.

NOBREGA, Petrus Gorgonio Bulhoes; NOBREGA, Selma Hissae Shimura. Perigo sísmico no Brasil e a responsabilidade da engenharia de estruturas. **HOLOS**, v. 4, p. 162-175, 2016.

OLIVEIRA, ANA PAULA G. et al. The expression of neotectonics in the Pantanal da Nhecolândia, State of Mato Grosso do Sul-Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1293-1308, 2018.

PARANHOS FILHO, Antônio Conceição et al. **Geodésia como Ferramenta de Apoio a Compreensão da Neotectônica do Pantanal: Exemplo na Estação Fluviométrica de Corumbá, Mato Grosso do Sul, Brasil**. Anuario do Instituto de Geociencias, v. 41, n. 3, 2018.

PEZESHK, Shahram et al. **Ground motion prediction equations for eastern North America using the hybrid empirical method and NGA-West2 empirical ground motion model**. NGA-East: Median Ground Motion Models for the Central and Eastern North America Region. p. 119-147, 2015.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J. & JORDAN, T.H. Os Terremotos. In. **Para entender a Terra**. Traduzido por MENEGAT R.; FERNANDES P.C.D.; FERNANDES L.A.D. & PORCHER C.C. Cap. 19. p. 470-497. Porto Alegre: Bookman. 656p. 2006.

RSBR Rede Sismográfica Brasileira, Disponível em <<http://rsbr.gov.br/projeto.html>> Acesso em 10 de Agosto de 2018

REITER, Leon. **Earthquake hazard analysis: issues and insights**. Columbia University Press, 1991.

RICCOMINI, C. & ASSUMPÇÃO, M. Quaternary tectonics in Brazil. *Episodes*, 22(3), 221-225. 1999.

RICHTER, Charles F. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 25, n. 1, p. 1-32, 1935.

SCHOBENHAUS, C.; RIBEIRO, C.L.; OLIVA, L.A.; TAKANOHASHI, J.T.; LINDENMAYER, Z.G.; VASCONCELOS, J.B. & ORLANDI, V. Folha Goiás (SD-22). In: *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo*, DNPM, Brasília, 113 p. 1975.

SILVA, L. J. **Levantamento histórico, cartográfico e análise da atividade sísmica na região Centro-Oeste do Brasil: ênfase na Bacia Sedimentar do Pantanal**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Câmpus de Aquidauana, p. 154. 2017.

SILVA, T. G. **Relocalização de sismos e zoneamento sismotectônico**. Dissertação (Mestrado Tecnologias Ambientais), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, p. 71. 2016.

SOARES, Paulo César; ASSINE, Mario Luís; RABELO, Luciano. The Pantanal Basin: recent tectonics, relationships to the Transbrasiliano Lineament. *Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, p. 459-469, 1998.

SOUZA, C. A.; LANI, J. L.; SOUSA, J. B. Origem e evolução do Pantanal Mato-grossense. **VI Simpósio nacional de geomorfologia/regionalconferencegeomorphology. Geomorfologia tropical e subtropical: processos, métodos e técnicas/Tropical and subtropical geomorphology: processes methods and techniques. Goiânia**, v. 6, p. 6-10, 2006.

SYKES, L. Intraplate seismicity, reactivation of pre-existing zones of weakness, alkaline magmatism, and other tectonism postdating continental fragmentation. *Rev. Geophys. Space Phys.* 16, 621-688. 1978.

TALWANI, P. & RAJENDRAN, K. Some seismological and geometric features of intraplate earthquakes. *Tectonophysics* 186, 19-41. 1991.

TORO, G. R.; ABRAHAMSON, N. A.; SCHNEIDER, J. F. Engineering model of strong ground motions from earthquakes in the central and eastern United States: best estimates and uncertainties. *Seismological Research Letters*, v. 68, n. 1, p. 41-57, 1997.

USSAMI, N.; SHIRAIWA, S. & DOMINGUEZ, J.M.L. Basement reactivation in a sub-Andean foreland flexural bulge: The Pantanal wetland, SW Brazil. *Tectonics*, 18: 25-39. 1999.

WEICHERT, Dieter H. Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 70, n. 4, p. 1337-1346, 1980.

WELLS, Donald L.; COPPERSMITH, Kevin J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, v. 84, n. 4, p. 974-1002, 1994.

ANEXOS

Tabela 3-Sismos utilizados neste trabalho

Ano	Lat	Long	Magnitude	Origem	Ano	Lat	Long	Magnitude	Origem
1744	-15.3	-58	2.8	Catálogo	2004	-17.2	-56.2	2.8	Catálogo
1876	-16.57	-57.82	3	Catálogo	2004	-16.22	-55.95	3.2	Catálogo
1879	-15.6	-56.1	3.5	Catálogo	2005	-16.81	-54.96	3	Catálogo
1906	-19	-57.64	4.2	Catálogo	2006	-16.31	-53.3	2.8	Catálogo
1919	-18	-56	4.9	Catálogo	2008	-17.17	-56.24	3.4	Catálogo
1941	-16.1	-54.5	4.4	Catálogo	2009	-18.49	-55.8	4.8	Catálogo
1947	-21.7	-57.9	3.5	Catálogo	2012	-15.64	-54.32	3.1	Catálogo
1963	-18	-56.5	4.6	Catálogo	2012	-18.41	-56.79	3.4	Catálogo
1963	-18	-56.6	4.9	Inédito	2013	-16.72	-54.36	3.2	Catálogo
1964	-18.06	-56.69	5.4	Catálogo	2013	-19.51	-56.54	2.6	Catálogo
1971	-17	-53.8	3.6	Catálogo	2014	-14.92	-58.65	2.5	Catálogo
1979	-21.02	-56.36	3.6	Catálogo	2014	-15.12	-59.95	2.9	Catálogo
1979	-20	-55.8	3.8	Catálogo	2014	-19.55	-57.37	3.7	Catálogo
1980	-16.6	-56.2	3.6	Catálogo	2014	-16.41	-56.29	2.6	Catálogo
1981	-16.86	-54.55	3.2	Catálogo	2014	-15.08	-59.94	2.9	Catálogo
1982	-16.5	-59.1	3.5	Catálogo	2014	-15	-59.85	2.8	Catálogo
1984	-21.28	-54.53	3	Catálogo	2015	-14.9	-59.69	3.2	Catálogo
1988	-20.66	-57.97	3.9	Catálogo	2015	-19.41	-56.35	3.2	Catálogo
1994	-22.76	-56.71	3	Catálogo	2016	-19.43	-56.35	3.5	Catálogo
1998	-17.91	-56.7	3.5	Catálogo	2016	-21.37	-57.06	3.1	Catálogo
1998	-18.13	-56.7	3.4	Catálogo	2016	-14.84	-54.18	3.7	Catálogo
1998	-18.41	-56.58	3.4	Catálogo	2016	-18.64	-56.48	3.1	Catálogo
1998	-19.15	-55.97	3.6	Catálogo	2017	-15.69	-56.41	3.1	Catálogo
1998	-16.37	-54.14	3	Catálogo	2017	-19.49	-56.33	2.7	Catálogo
2000	-16.03	-56.53	3.7	Catálogo	2017	-15.6	-59.33	3.2	Catálogo
2003	-16.73	-54.29	3.7	Catálogo	2017	-15.43	-56.06	2.6	Catálogo
2003	-17.38	-56.22	3.5	Catálogo	2017	-15.74	-58.86	2.9	Catálogo
2004	-18.4	-56.21	3	Catálogo					

Fonte: dados coletados pela autora com o IAG USP e SILVA(2017)