

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FABIOLA KAVIATKOVSKI

POTENCIAL DE USO DO MODELO VAPOR-TERREMOTO (*EARTHQUAKE
VAPOR MODEL*) NA PREVISÃO DE TERREMOTOS NO CHILE

PONTAL DO PARANÁ

2018

FABIOLA KAVIATKOVSKI

POTENCIAL DE USO DO MODELO VAPOR-TERREMOTO (*EARTHQUAKE
VAPOR MODEL*) NA PREVISÃO DE TERREMOTOS NO CHILE

Monografia apresentada como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel, Curso de
Oceanografia, Centro de Estudos do Mar,
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Almeida Noernberg

PONTAL DO PARANÁ


2018

TERMO DE APROVAÇÃO


Fabiola Kaviatkovski

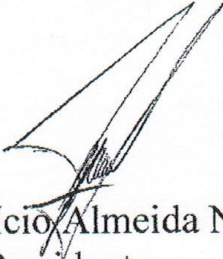
“POTENCIAL DE USO DO MODELO VAPOR - TERREMOTO (EARTHQUAKE VAPOR MODEL) NA PREVISÃO DE TERREMOTOS NO CHILE”

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:


Prof. Dr. Carlos Roberto Soares - CEM/UFPR


Prof. MSc. Joaquim Pereira Bento Netto Júnior - PUC/Chile


MSc. Diana Melo Italiani - Doutoranda PGSISCO/UFPR


Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg
Presidente

Pontal do Paraná, 05 de dezembro de 2018.

À minha família humana, canina e felina

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela saúde e força para superar as dificuldades.

A Universidade Federal do Paraná, principalmente o Centro de Estudos do Mar, seu corpo docente, coordenação e administração, pelo ambiente amigável que proporcionaram durante a minha graduação.

Ao meu orientador, Professor Doutor Mauricio Almeida Noernberg, pela atenção e paciência, pelas suas correções e incentivos.

Aos meus pais, Sergio e Celia, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Aos Doutores Luiz Antonio Mendonça, Francielly Peron e Lorena Haluch, pelos conselhos e assistência.

Aos meus amigos e amigas, que não negaram força e ficaram na torcida.

RESUMO

Os terremotos são reflexo dos movimentos das placas tectônicas quando se chocam ou se atritam. Seus efeitos destrutivos fazem com que pesquisas voltadas para métodos de previsão sejam necessárias. Dentre estes estudos, o que apresenta um intervalo de tempo significativo entre o primeiro sinal e o terremoto seguinte é o Modelo Vapor-terremoto. Este modelo é baseado na interação entre a água subterrânea, que percola uma fenda geológica com a alta temperatura e pressão, causada pela fricção entre as rochas, que gera o Vapor-terremoto. Este vapor pode formar uma Nuvem-terremoto, ou uma Georupção, tendo ambas aparecimento repentino, curta durabilidade e alta temperatura, e que pode ser usada como indicador de abalos sísmicos. A visualização da Nuvem-terremoto pode ser feita por meio de sensoriamento remoto e corroborada por dados de temperaturas anômalas. Este trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia do Modelo Vapor-terremoto para sismos ocorridos no Chile, país conhecido como um dos mais sísmicos do mundo. Para isso, os dados de terremotos ocorridos em 2017 foram adquiridos do *United States Geological Survey* (USGS), as imagens do satélite GOES da *University of Dundee* (DU), e os dados de temperatura da *Weather Underground* (WU). Foram selecionados quatro eventos sísmicos de magnitude ≥ 6 na escala Richter. No evento do dia 15 de abril, duas nuvens lineares foram observadas 94 dias antes do terremoto, em três das quatro faixas do espectro analisadas, e não houve evidência de anomalia de temperatura. Nos tremores dos dias 23 e 24 de abril, um conjunto de Nuvens-terremoto foi registrado no 11º dia precedente, com evidência de anomalia de temperatura. No evento do dia 10 de outubro uma Nuvem-terremoto foi identificada 87 dias antes do sismo, também com evidência de anomalia de temperatura. Pode-se concluir que as imagens GOES proporcionam uma boa identificação das Nuvens-terremoto embora não se tenha identificado uma única faixa do espectro como a mais adequada, e que a eficácia do Modelo Vapor-terremoto para os tremores ocorridos no Chile em 2017 foi de 75%.

Palavras – chave: Previsão de terremoto. Nuvem-terremoto. Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Earthquakes are the result of the movement of tectonic plates when they collide or scrape. Their destructive effects make research on forecasting methods needed. Among these studies, the model that has shown significant time interval between the first signal and the following earthquake is the Earthquake-Vapor Model. This vapor can form an Earthquake Cloud or a Geoeruption. Both have a sudden appearance, short durability, and high temperature, and they can be used to predict earthquakes. The Earthquake Cloud viewing is made through remote sensing and corroborated by abnormal temperature data. The objective of this study is to evaluate the effectiveness of the Vapor-Earthquake Model for earthquakes in Chile, a country known as one of the most seismic in the world. To do so, earthquake data from 2017 was obtained from the United States Geological Survey (USGS), as well as GOES satellite images from the University of Dundee (DU), and temperature data from the Weather Underground (WU). Four seismic events of magnitude ≥ 6 were selected. In the case of April 15, two linear clouds were observed 94 days before the earthquake in three of the four bands of the spectrum that were analyzed, and there was no evidence of abnormal temperature. In the quakes of 23 and 24 April, a mass of Earthquake Clouds was recorded on the 11th day preceding the earthquake, with evidence of abnormal temperature. In the case of October 10, an Earthquake Cloud was identified 87 days before the earthquake, also with evidence of temperature anomaly. It can be concluded that the GOES images provide a good identification of Earthquake Clouds, even though a single spectrum band was not identified as the most adequate, and the effectiveness of the Vapor-Earthquake Model for the earthquakes in Chile in 2017 was 75%.

Key-words: Earthquake prediction. Earthquake Cloud. Remote sensing.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 Objetivo geral	11
1.1.2 Objetivos específicos	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 HISTÓRICO.....	12
2.2 MODELO VAPOR-TERREMOTO.....	12
2.3 USO DO SENSORIAMENTO REMOTO.....	14
3 METODOLOGIA.....	16
3.1 ÁREA DE ESTUDO	16
3.1.1 Geomorfologia.....	16
3.1.2 Clima	17
3.2 AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	18
3.2.1 Dados dos Terremotos.....	19
3.2.2 Imagens de Satélite.....	20
3.2.3 Dados de Temperatura Atmosférica.....	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1 A – TERREMOTO DO DIA 15 DE ABRIL	22
4.2 B e C – TERREMOTOS DOS DIAS 23 E 24 DE ABRIL	24
4.3 D - TERREMOTO DO DIA 10 DE OUTUBRO	28
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
ANEXO 1 – IMAGENS DAS NUVENS-TERREMOTO DISPONIBILIZADAS POR SHOU E FANG (2016)	36

1 INTRODUÇÃO

Os terremotos são fenômenos sobre os quais o homem não tem controle e que podem ocorrer a qualquer momento (TIBOLA, 2011). Eles fazem parte de um processo endógeno da Terra, no qual as placas tectônicas, que sustentam os continentes e os oceanos, são impulsionadas pelo movimento do magma incandescente do interior da crosta (PEREIRA *et al.*, 2008).

Por se movimentarem lenta e continuamente, as placas se chocam ou se atritam. Quando ocorre um acúmulo de pressão, elas podem sofrer movimentos bruscos de três tipos: i) convergente - que ocorre quando as placas tectônicas colidem, onde a mais densa mergulha sob a outra, formando fossas e cordilheiras; ii) divergente - quando as placas se afastam uma da outra formando uma nova crosta oceânica; e iii) transformante - quando as placas deslizam lateralmente uma em relação à outra, sem destruição ou geração de crostas (TASSINARI, 2000).

Esses movimentos refletem-se em abalos sísmicos, que podem ter duração de segundos a alguns minutos. O ponto no interior da Terra onde se origina o terremoto denomina-se hipocentro, e o ponto na superfície terrestre onde ele alcança maior intensidade, epicentro. Entretanto, se o epicentro estiver no fundo do mar, o movimento dos blocos tectônicos pode deslocar grandes quantidades de água e dar origem a um maremoto (PEREIRA *et al.*, 2008).

Também conhecido como tsunami, essa onda pode atingir facilmente 30 metros de altura, propagando-se a grandes velocidades e podendo causar sérias inundações e até mesmo devastar zonas litorâneas. Dentre outros efeitos, os tremores podem causar a abertura de fraturas no solo, o desvio das correntezas de rios e a destruição parcial ou completa de cidades. No entanto, o efeito mais terrível é a perda de vidas humanas (PEREIRA *et al.*, 2008).

Diante disso, vários métodos para prever terremotos estão sendo estudados, tendo como exemplo os *foreshocks* e o comportamento animal. De acordo com o USGS, *foreshocks* são tremores que precedem terremotos maiores. Porém, não pode ser caracterizado um *foreshock* até que um grande evento sísmico ocorra na mesma área. No caso do comportamento animal, acredita-se que os animais são mais capazes de perceber certos tipos de estímulos geofísicos que precedem um terremoto do que os seres humanos (BHARGAVA, 2009). Por exemplo, os que vivem na água,

ou perto dela, são capazes de sentir alterações na sua composição química poucos dias antes do solo se mover e o terremoto acontecer, uma vez que as rochas sob estresse na crosta terrestre liberam partículas carregadas eletricamente que reagem com a água presente (GRANT *et al.*, 2011).

Já com o auxílio da tecnologia, foram criados equipamentos mais precisos para a previsão de abalos como, por exemplo, o microssatélite DEMETER (*Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquakes Regions*) lançado em junho de 2004, com o objetivo de detectar e caracterizar perturbações elétricas e magnéticas da ionosfera relacionadas com uma atividade sísmica. Este satélite é inteiramente dedicado a estas observações, através da coleta contínua de dados na latitude invariante entre 65° Norte e Sul (CUSSAC, *et al.* 2006).

Todos esses métodos citados acima reconhecem um vestígio que permite prever o terremoto, porém, com um pequeno intervalo de tempo (horas - dia), entre o primeiro sinal e o abalo sísmico.

O Modelo Vapor-terremoto (*Earthquake Vapor Model*), proposto pela primeira vez por Shou (1999), permite a identificação de vestígios com uma janela de tempo máxima de 112 dias entre o primeiro indício e o terremoto seguinte (SHOU e FANG, 2016). Desta forma, oferece um espaço de tempo vantajoso, quando considerada a necessidade enviar alertas às agências nacionais e internacionais e a sociedade civil para a tomada de ações preventivas em caso de eventos severos (TIBOLA, 2011).

Outra diferença é que este modelo se baseia em mecanismos geofísicos ao invés de correlações de determinados fenômenos com terremotos (SHOU e FANG, 2016). Ou seja, parte do princípio que a água, que percola a fenda geológica, gera um vapor que é liberado na atmosfera. Este vapor, chamado de Vapor-terremoto (*Earthquake Vapor*), possui as características singulares de aparecimento repentino, curta durabilidade e alta temperatura, devido ao fato de o vapor ter um ponto fixo na crosta (SHOU e HARRINGTON, 2005). Dessa forma, a identificação desse fenômeno é feita por meio de imagens de satélites geoestacionários, podendo ser validada por dados anômalos de temperatura do ar.

Além disso, o modelo mostra ser universal, uma vez que o Vapor-terremoto já foi identificado em sismos ocorridos no oceano e no continente, com hipocentros de baixas e altas profundidades (SHOU e FANG, 2016).

Neste contexto, para o presente trabalho foi aplicado o Modelo Vapor-terremoto em abalos sísmicos ocorridos no Chile, país que tem grande parte de seu

território exposto à convergência das placas de Nazca e Sul-americana e uma extensa zona costeira. Historicamente, o Chile é reconhecido pelo terremoto de 1960 que atingiu a cidade de Valdivia. Este tremor no mar provocou tsunamis e vitimou de 2.000 a 5.700 pessoas, tendo as ondas formadas atingido também o Japão, Filipinas e Havaí (PEREIRA *et al.*, 2008; DERBLI, 2010). Este foi o abalo sísmico com a maior magnitude registrada, atingindo 9,5 na escala Richter (BBC, 2017) que varia de 1 a 10 (PEREIRA *et al.*, 2008).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a eficácia do Modelo Vapor-terremoto na previsão de terremotos de magnitude ≥ 6 na escala Richter que ocorreram no território chileno no ano de 2017.

1.1.2 Objetivos específicos

- Aplicar o Modelo Vapor-terremoto nos sismos de magnitudes ≥ 6 ocorridos no Chile em 2017;
- Validar o Modelo Vapor-terremoto através da relação entre a identificação do Vapor-terremoto nas imagens satelitais e os valores anômalos de temperatura do ar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

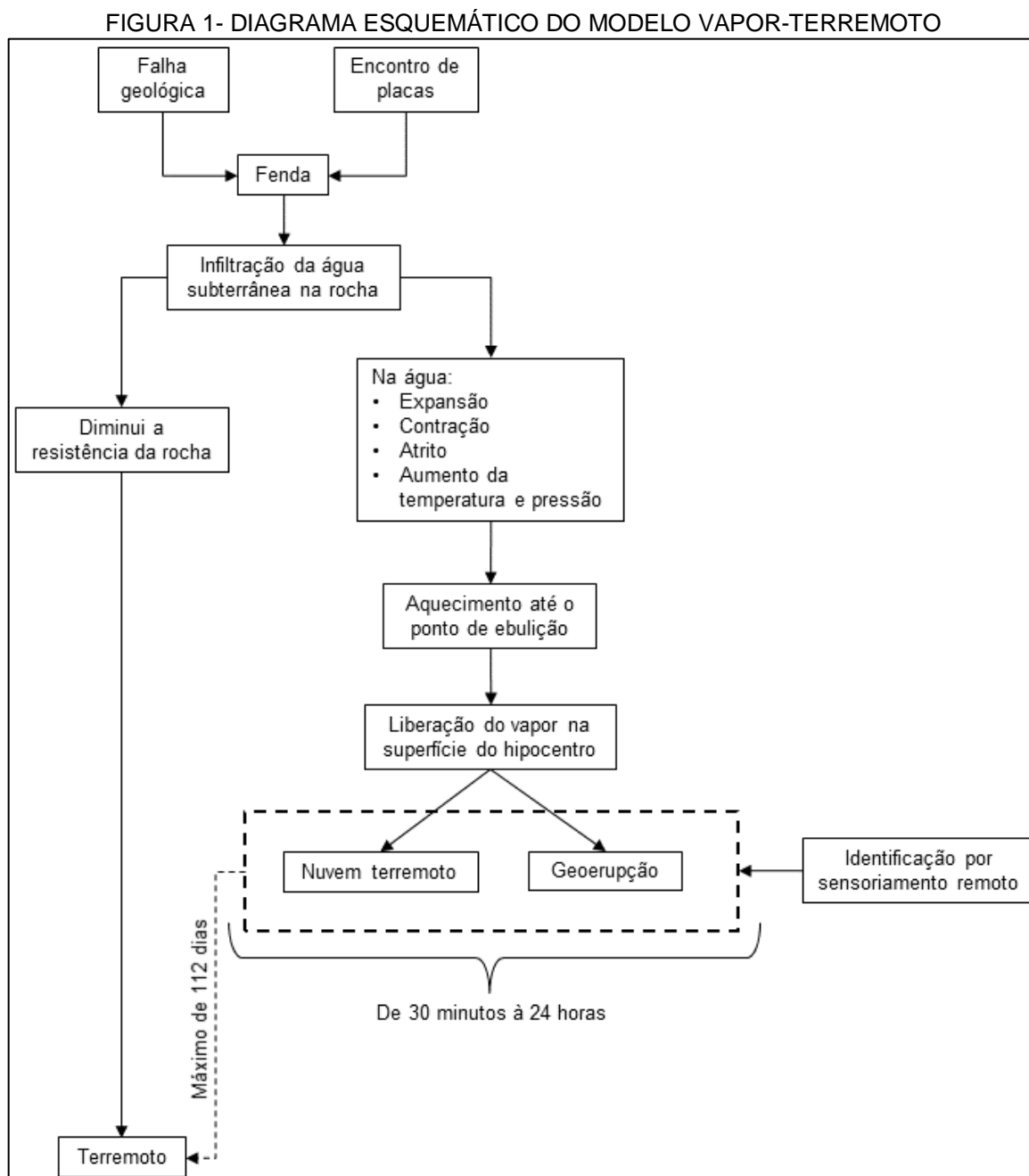
2.1 HISTÓRICO

Nos anos 80, foram notadas algumas anomalias térmicas de curta duração em imagens satelitais no espectro do infravermelho (IR), justamente sobre zonas de grandes deslocamentos tectônicos na Ásia Central (GORNÝ, *et al.*, 1988). Posteriormente, esta mesma anomalia foi analisada em terremotos na China, Japão, Índia, Irã e Argélia por meio de sensoriamento remoto (QIANG *et al.*, 1990; XU *et al.*, 1991; TRONIN, 1996; NOSOV, 1998; TRONIN *et al.*, 2002; OUZOUNOV e FREUND 2004; SARAF e CHOUDHURY, 2004 apud GUO e WANG, 2008). No entanto, foi associado pela primeira vez esta anomalia térmica com nuvens lineares, ambas observadas em imagens de satélite, em 1997. As distintas nuvens foram constatadas sobre uma falha geológica ativa, atribuindo-se a este fato o nome “desgaseificação da terra”, pois foi considerado que um gás emitido da crosta deteriorou uma nuvem existente formando um traço contínuo (MOROZAVA, 1997 apud GUANGMENG e JIE, 2013). Por fim, a utilização dessa associação para se prever sismos, deu origem ao Modelo Vapor-terremoto, quando Shou (1999) previu alguns terremotos, reportando-os ao USGS e obtendo sucesso.

2.2 MODELO VAPOR-TERREMOTO

O Modelo Vapor-terremoto baseia-se no pressuposto que quando uma enorme rocha é imposta a forças externas, suas partes fracas se quebram primeiro. Isso induz fissuras nas quais a água subterrânea se infiltra. Com a expansão e contração desta água, concomitante ao atrito e erosão causados, faz com que a rocha fique ainda mais enfraquecida. Por sua vez, o movimento do solo gera uma fricção que aquece esta água, produzindo um vapor em alta temperatura e pressão. Posteriormente, este vapor é liberado para a atmosfera em um hipocentro iminente à superfície, seja pelas fendas e/ou por um bocal, agora denominado Vapor-terremoto. Quando liberado, o vapor encontra ar frio e forma uma massa densa denominada Nuvem-terremoto (*Earthquake cloud*) (SHOU, 1999). Por outro lado, a Geoerupção (*Geoeruption*) provoca a dissipação de nuvens existentes formando um espaço vazio, causado pelo repentino aquecimento atmosférico sobre o ponto inerte ao solo

(FIGURA 1). Desta forma, quanto maior for a massa da nuvem, ou quanto maior for o espaço vazio, maior será a magnitude do futuro terremoto. Além disso, tanto a Nuvem-terremoto quanto a Geoerupção mantêm-se fixos na atmosfera, ao contrário das nuvens já existentes na região (SHOU e HARRINGTON, 2005).



FONTE: A autora (2018).

Neste contexto, após numerosas observações, Shou (2006) sugeriu os seguintes coeficientes empíricos para a previsão de um terremoto: para nuvens lineares de aproximadamente 300 km e 350 km, as magnitudes previstas são 6 e 7 na

escala Richter, respectivamente. Para liberações de vapor contínuo com 10 horas de duração a previsão é de um evento com magnitude 5, e para 24 horas a magnitude é de 6.

Para auxiliar na validação do modelo, Shou (2011) definiu previamente como temperatura anômala aquela que cumpre pelo menos um dos quesitos abaixo:

- I. A temperatura do ar atinge ou ultrapassa 60°C (a mais alta registrada pela meteorologia);
- II. A tendência em temperaturas horárias mostra um pulso;
- III. A temperatura máxima diária atinge a mais alta em um mês;
- IV. A temperatura máxima diária atinge ou ultrapassa os máximos diários do mesmo dia em outros anos;
- V. Se, comprovadamente, a temperatura mais alta diária for devido um Vapor-terremoto, a segunda mais alta também é considerada anormal;
- VI. O aumento da temperatura máxima diária é muito mais elevada que aos arredores.

2.3 USO DO SENSORIAMENTO REMOTO

Para a aplicação do Modelo Vapor-terremoto é necessário se ter a frequente visualização de um mesmo ponto com a menor resolução temporal possível, portanto os satélites geoestacionários tornam-se uma opção adequada para uso. Esses satélites encontram-se a cerca de 35.800 km da Terra, em órbita equatorial geossíncrona, com velocidade de deslocamento coincidente com a velocidade de rotação da Terra (EMPRAPA, 2013).

Neste caso, o Satélite Meteorológico GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*) é especialmente destinado ao monitoramento contínuo da Terra e da atmosfera, disponibilizando imagens da América do Sul a cada 60 minutos (ÁVILA, 2006). Assim, considera-se esta resolução temporal suficiente para monitorar os movimentos contínuos das nuvens e detectar o Vapor-terremoto, que as vezes existe por menos de 10 horas (GUANGMENG e JIE, 2013).

Atualmente, o GOES-15 é o satélite responsável pela missão GOES-Leste, estando na longitude de 75°O sobre a linha do Equador, com algoritmo baseado em limites nos canais do visível (VI) (0,5 μ m a 0,7 μ m), que obtém informações a partir da energia proveniente do sol e refletida pelos alvos, com a resolução espacial de 1 km;

IR-termal ($10,2\mu\text{m} - 11,20\mu\text{m}$), que mede a energia radiante emitida da superfície da terra em direção à atmosfera; IR-médio ($3,80\mu\text{m} - 4,00\mu\text{m}$), que mede a energia radiante refletida, sendo que ambos os canais de IR possuem resolução espacial de 4 km; e o vapor d'água (WV) ($5,8\mu\text{m} - 7,3\mu\text{m}$), que detecta o vapor de água presente nas camadas da atmosfera, com a resolução espacial de 8 km (MORAES, 2002;).

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Uma característica geográfica notável do Chile são os 48° de extensão latitudinal de costa, de 18,4 a 56°S, que representa cerca de 55.000 km efetivos de litoral (CAMUS, 2001) (FIGURA 2). Conhecido como um dos países mais sísmicos da Terra, teve em média nos últimos cinco séculos um terremoto destrutivo de magnitude superior a 8 a cada 10 anos. Sabe-se que em toda a costa, desde Arica (18°S) a península de Taitao em Aisén (47°S), já houve pelo menos um evento de magnitude superior a 8 (MADARIAGA, 1998).

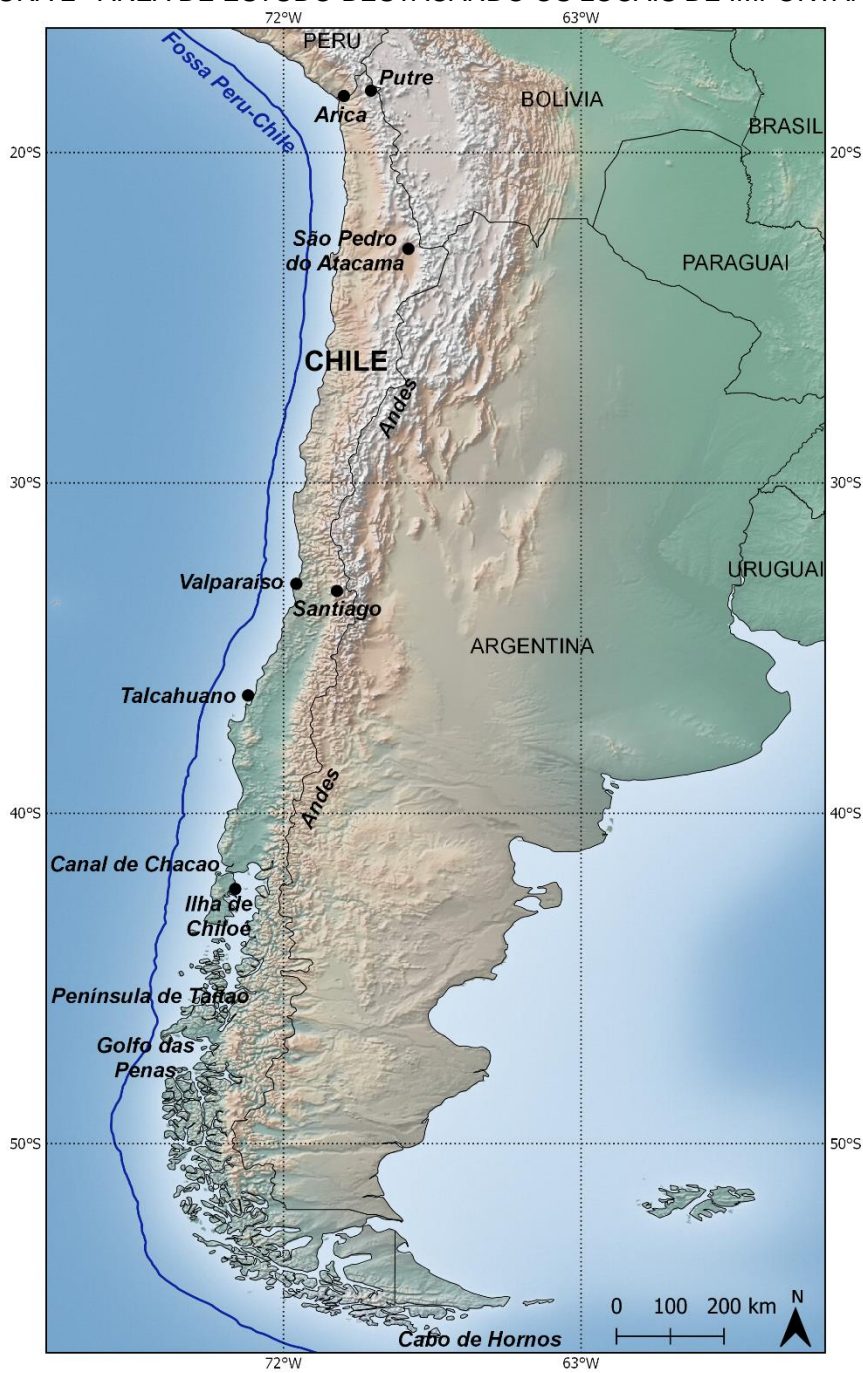
3.1.1 Geomorfologia

A forma e a configuração da borda ocidental da América do Sul revelam dois cenários geográficos contrastantes. Por um lado, o litoral do Peru até a Ilha de Chiloé (41°47'S) é contínuo, suave e sem rupturas ou grandes recortes geográficos. Nesta região, destaca-se a cidade de Arica (18°20'S), onde a costa muda abruptamente de uma orientação S – O para N – O. A partir deste ponto, a costa é praticamente em linha reta até o Canal de Chacao (Norte de Chiloé), constituindo a unidade geomorfológica das planícies litorâneas, uma das quatro principais no Chile junto com a depressão intermediária e as Cordilheiras dos Andes e da Costa (BENÍTEZ, 1994). Por outro lado, toda a borda continental desde Chiloé até o Cabo de Hornos (56°S) é um grande sistema de ilhas com uma profusão de baías, fiordes e canais, uma paisagem complexa resultante do efeito combinado de processos tectônicos e glaciais (CAMUS, 2001).

Em relação à configuração do fundo oceânico, a margem continental sul-americana se caracteriza pela presença de uma fossa que faz fronteira com a placa de Nazca e se estende por cerca de 5.000 km do Equador até 46°S (Golfo de Penas). Nesse ponto, a cordilheira submarina chilena alcança o continente, marcando a confluência das placas Sul-americana, de Nazca e Antártica (AHUMADA *et al.*, 2000). Essas características demonstram o papel dos processos tectônicos na geomorfologia costeira e explicam por que a plataforma continental chilena é extremamente estreita em comparação com a costa do Atlântico, com uma largura máxima de cerca de 45

km na área de Talcahuano ($36^{\circ}40'S$), e uma profundidade máxima em geral de 150 metros, exceto para a área de Valparaíso ($33^{\circ}S$) onde alcança até 800 metros (CAMUS, 2001).

FIGURA 2 –ÁREA DE ESTUDO DESTACANDO OS LOCAIS DE IMPORTÂNCIA.



FONTE: A autora (2018)

3.1.2 Clima

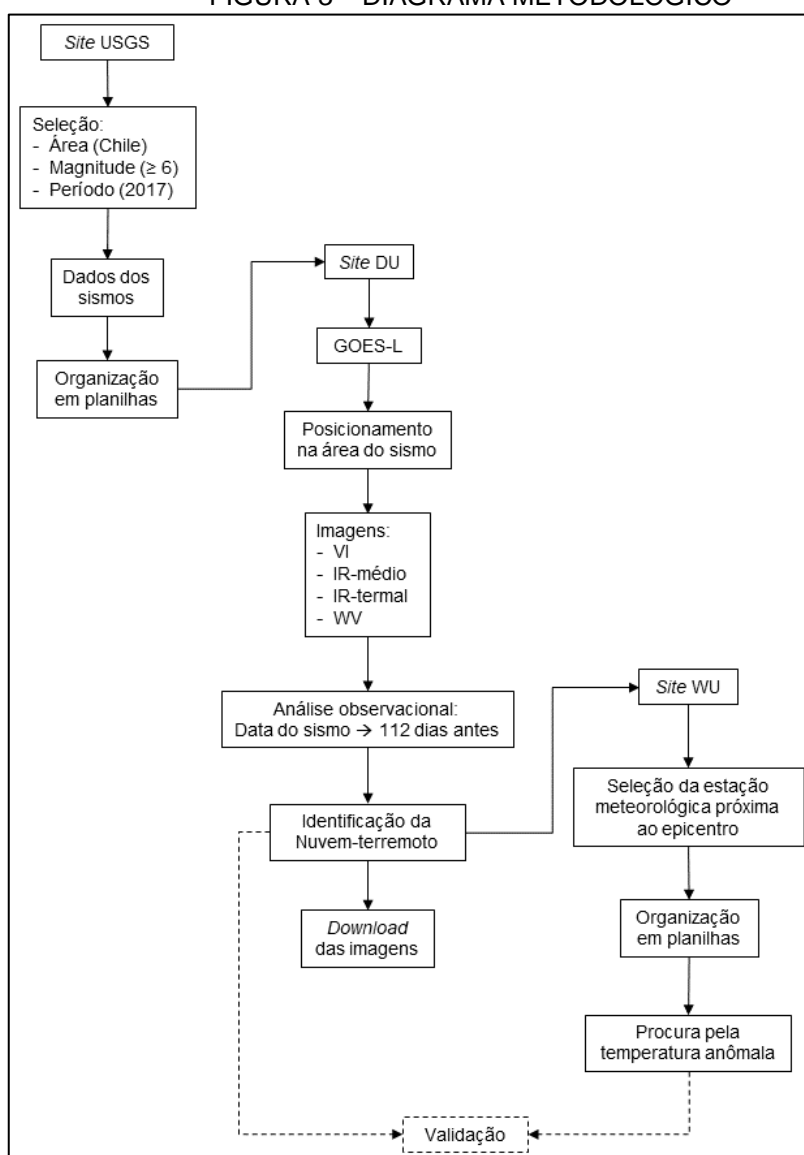
Entre 18,4 e 27°S, a costa é uma região bioclimática chamada litoral desértico, com condições áridas todo o ano e com uma alta influência oceânica, que a diferencia da região desértica interior de aridez extrema. O deserto costeiro é uma característica particular da margem ocidental de continentes próximos a giros oceânicos, que resultam da interação entre as massas de ar descendente nos trópicos e dos ventos que se deslocam para o continente depois de passarem por massas de água fria, criando um efeito intensificado da desertificação (BROWN e LOMOLINO, 1998). Em direção a latitudes mais altas, esse efeito é menos intenso e as condições de aridez se atenuam, alternando progressivamente com períodos mais úmidos ou frios de Norte a Sul. Entre 27 e 39°S se encontra uma grande zona mediterrânea com uma sucessão de regiões bioclimáticas, variando desde características áridas no extremo Norte à úmidas no extremo Sul, e onde a costa também está diferenciada do interior pela influência marinha. Entre 39 e 56°S se entende a zona oceânica diferenciada em três regiões bioclimáticas: uma oceânica com influência mediterrânea (39 - 44°S), uma oceânica quente-fria (44 - 52°), e uma oceânica subantártica (52 - 56°S) (CAMUS, 2001).

As três principais zonas climáticas estão associadas com a presença do anticiclone subtropical do Pacífico Sul, cujo centro é, em média, em 30°S. Devido seu ciclo anual de deslocamento, sua influência é clara na zona mediterrânea, favorecendo as precipitações ao se deslocar para o Norte no inverno e causando o efeito inverso ao mover-se para o Sul no verão (VILLAGRÁN, 1995). A influência do anticiclone é permanente ao Norte de 30°S, mantendo as condições secas, e fraco ao Sul de 40°S, onde há chuva durante todo o ano (CAMUS, 2001).

3. 2 AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

Para a realização desta pesquisa fez-se uma adaptação do modelo sugerido por Shou e Fang (2016) (FIGURA 3). Em virtude do método recorrer a conhecimentos empíricos, optou-se pela seleção de apenas sismos de magnitudes ≥ 6 na escala Richter, os quais estão presentes no reconhecimento tanto para as nuvens lineares, quanto para as de vapor contínuo.

FIGURA 3 – DIAGRAMA METODOLÓGICO



FONTE: A autora (2018).

3.2.1 Dados dos Terremotos

Os dados de sismos foram obtidos gratuitamente através da página eletrônica do USGS (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>), no qual pode-se obter apenas as informações desejadas utilizando a ferramenta de filtro. Neste caso, foram selecionados os tremores de magnitude entre 6 e 10 na escala Richter para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2017 nas coordenadas geográficas 17°-56° S e 66°-76° O. Além destes elementos, também se obteve a profundidade do sismo em quilômetros, a hora local (GMT - *Greenwich Mean Time*) em que ocorreu o evento e a localização em relação às cidades próximas.

3.2.2 Imagens de Satélite

Foram obtidas imagens do satélite GOES-L já processadas mediante um cadastro gratuito feito na página eletrônica da *Dundee Satellite Receiving Station* (<http://www.sat.dundee.ac.uk>), pertencente à DU. Nesta, foram selecionadas as imagens e feita a análise observacional utilizando a ferramenta *timelapse*, a qual sequencia automaticamente os arquivos selecionados em uma animação. Nesta etapa, a seleção das imagens concomitante as análises foram do 112º dia precedente até a data de ocorrência do sismo.

Além da animação, outra ferramenta usada foi a de coordenada geográfica, de modo que o ponteiro foi posicionado com exatidão sobre o ponto desejado (epicentro), facilitando a localização visual dos fenômenos. Dessa forma, foi possível acompanhar o comportamento atmosférico no decorrer de cada série de imagens de 24 horas, onde 1 dia compreende 4 séries, em razão da análise visual ter sido feita nos canais do WV, VI, IR-médio e IR-termal.

Neste contexto, a resolução temporal das imagens foi de 3 horas, e quando possível, 1 hora, dependendo da posição latitudinal do sismo e da disponibilidade das imagens pela DU.

Por fim, quando observado os fenômenos, foi feito o *download* da respectiva série de imagens.

3.2.3 Dados de Temperatura Atmosférica

Para corroborar os dados observacionais de satélite, dados de temperatura atmosférica foram obtidos gratuitamente pela página eletrônica da WU (<https://www.wunderground.com>), o qual dispõe de um banco de dados histórico de temperaturas horárias. Neste, foram selecionadas as estações meteorológicas próximas aos locais onde ocorreram os terremotos. Assim como com os sismos, a seleção dos dados de temperatura teve início 112 dias antes da data em que ocorreu o tremor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor entendimento, os resultados obtidos de acordo com as análises observacionais e corroborativa serão apresentados e discutidos por eventos (TABELA 1).

TABELA 1- DADOS DOS TERREMOTOS ANALISADOS

EVENTO	DATA (dia/mês)	HORA (hh:mm)	LAT (WGS84)	LONG (WGS84)	PROF (km)	MAG (Escala Richter)	LOCALIZAÇÃO
A	15/04	08:19	-23,27	-67,72	155	6,3	63 km SO de São Pedro do Atacama
B	23/04	02:36	-33,04	-72,03	21	6	37 km O de Valparaiso
C	24/04	21:38	-33,04	-72,06	28	6,9	40 km O de Valparaiso
D	10/10	06:32	-18,57	-69,75	85	6,3	46 km SSO de Putre

FONTE: A autora (2018).

Tanto as imagens de satélite quanto os dados de temperatura do ar foram analisados a partir do 112º dia precedente a data do determinado terremoto. Isso porque Shou (2006) descreve que 10% das liberações do Vapor-terremoto são completas e seguidas pelo terremoto dentro de 3 dias. Nos outros 90% dos casos, a liberação é incompleta, sendo possível uma segunda dentro de 112 dias. Para os quatro eventos um total de 18.714 imagens foram analisadas (TABELA 2).

TABELA 2 – NÚMERO DE IMAGENS ANALISADAS EM CADA FAIXA DO ESPECTRO POR EVENTO.

EVENTO	VI	IR-médio	IR-termal	WV	TOTAL
A	444	896	896	896	3.132
B	444	893	893	893	3.123
C	444	893	893	893	3.123
D	1.344	2.616	2.688	2.688	9.336
					18.714

FONTE: A autora (2018).

De acordo com a metodologia descrita, pode-se verificar os dados dos sismos juntamente com as estações meteorológicas selecionadas (FIGURA 4), sendo as mais próximas dos epicentros, e que obtinham dados históricos de temperatura atmosférica horária.

FIGURA 4 – LOCALIZAÇÃO DOS SISMOS ESTUDADOS E RESPECTIVAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS.



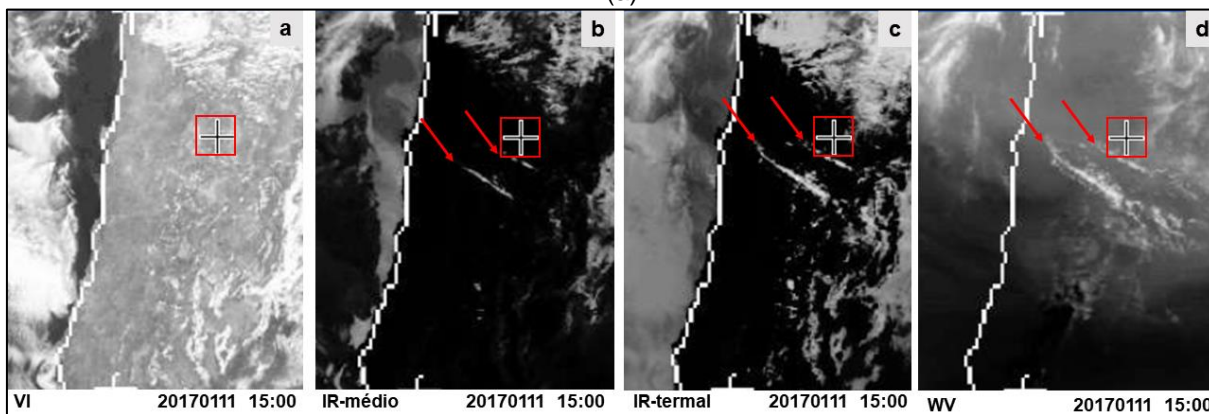
FONTE: A autora (2018)

4.1 A – TERREMOTO DO DIA 15 DE ABRIL

Duas nuvens lineares foram observadas às 15 horas UTC do dia 11 de janeiro, noventa e quatro dias antes do sismo, nas faixas do IR-médio, IR-termal e WV, sendo praticamente inexistentes no canal VI (FIGURA 5a), e mais notáveis no terceiro e quarto espectro (FIGURA 5c e 5d). A comparação revela que o Vapor-terremoto aparece diferente em imagens de distintos comprimentos de onda. Fato semelhante

foi notado por Shou e Fang (2016) para uma Nuvem-terremoto que era vista claramente na banda do VI, mas nem tanto na do IR.

FIGURA 5 – IMAGENS DO GOES-15 NO DIA 11/01/17 ÀS 15 HORAS UTC. NUVENS LINEARES OBSERVADAS NOS CANAIS IR-médio (b), IR-termal (c) E WV (d), AO CONTRÁRIO DA FAIXA DO VI (a).



O símbolo + e o quadrado vermelho indicam a localização do epicentro (-23°27' S, 67°72' O); e a flecha mostra posição das nuvens. FONTE: Adaptação de DU.

No que diz respeito ao formato linear, Shou e Fang (2016) avistaram nuvens de aparência similar. Entretanto, os dados horários de temperatura atmosférica dos dias anteriores à 11 de janeiro não apresentaram nenhuma anomalia compreendida na classificação de Shou (2011).

Desse modo, não se descarta a possibilidade das nuvens lineares do dia 11 de janeiro serem Nuvens-terremoto, uma vez que os dados de temperatura atmosférica podem ter sofrido interferência de fatores climáticos, ou o fato da ausência do dado das 19 horas no dia 10 de janeiro. Como pode ser visto nos eventos sísmicos seguintes aqui descritos, um valor horário pode representar um pico na temperatura diária, tornando-se de extrema importância na classificação de Shou (2011).

Shou e Fang (2016) alegam que a página eletrônica da WU não exhibe muitos dados de temperatura da superfície acima de 60°C, registrados por aeroportos. Os autores apresentam 18 exemplos de dados que foram apagados da página, sendo que após este episódio, a WU respondeu em 23 de julho de 2010 que "supomos que qualquer temperatura maior que a temperatura mais alta registrada na Terra (59°C) é um erro e deve ser excluído". Sabe-se que os termômetros atuais podem medir com precisão temperaturas acima de 100°C, porém as estações meteorológicas e os principais aeroportos estão acostumados a pular altas temperaturas. Somente um pequeno número de aeroportos registrou altas temperaturas, que são evidências

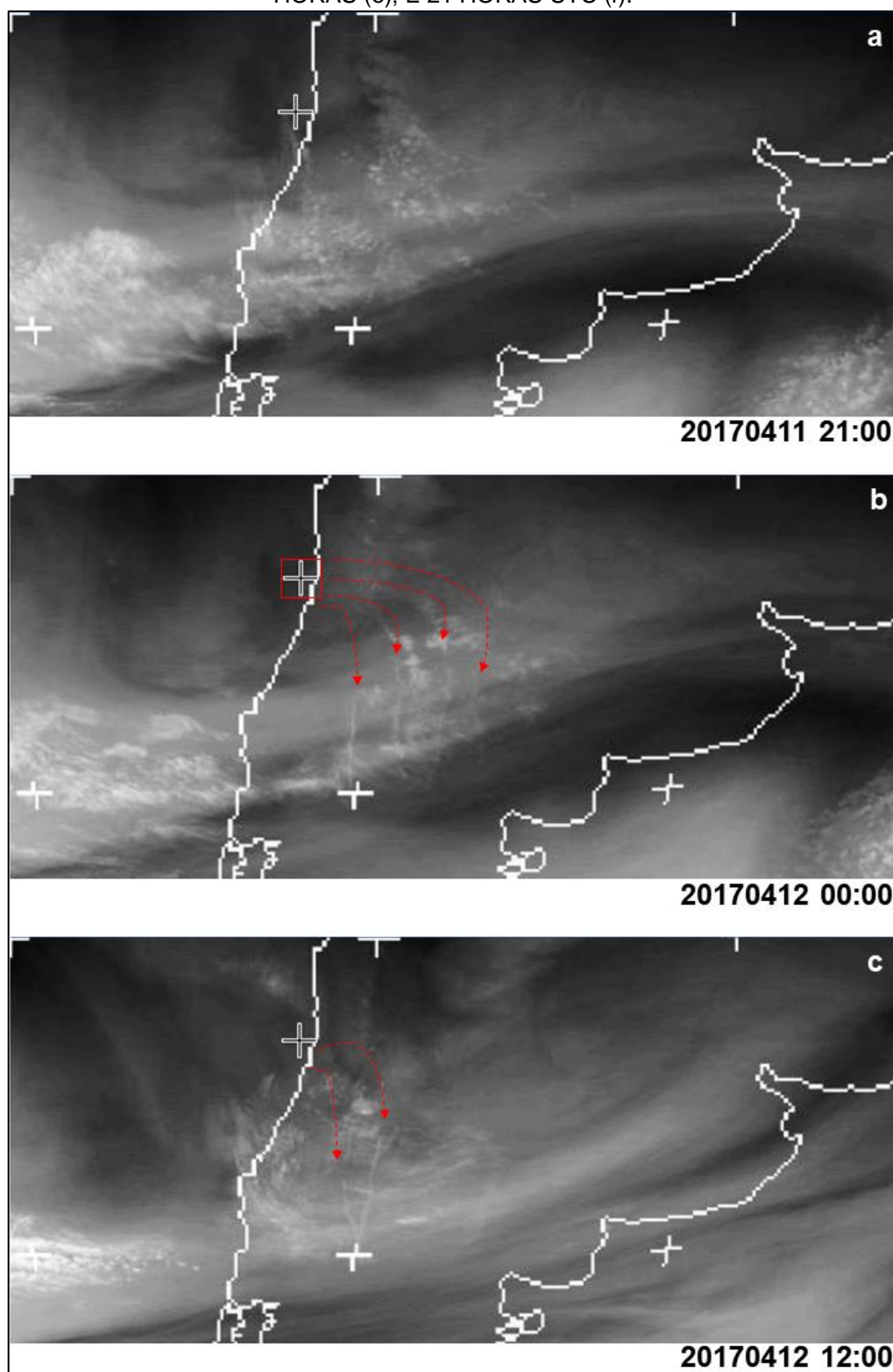
importantes e que sustentam a teoria de Shou, ainda que esses aeroportos não anunciem essas altas temperaturas como máxima diária.

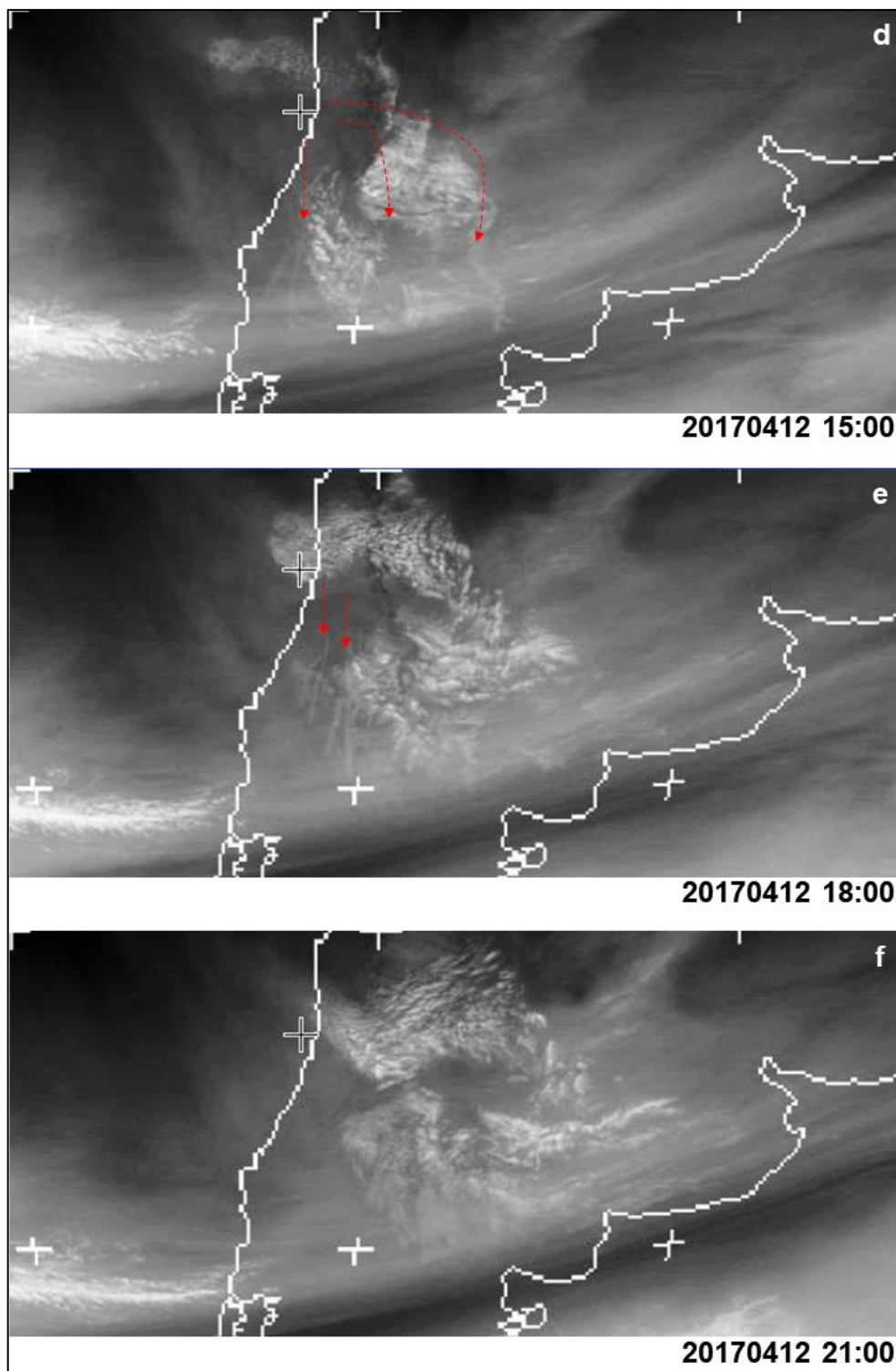
4.2 B e C – TERREMOTOS DOS DIAS 23 E 24 DE ABRIL

Devido à proximidade dos tremores, optou-se pela junção dos resultados, a fim de facilitar a discussão dos mesmos.

Um conjunto de Nuvens-terremoto com formatos lineares (FIGURA 6) foi avistado no canal WV no dia 12 de abril, onze dias antes dos tremores de magnitudes 6 e 6,9 na escala Richter. A formação do fenômeno teve início às 21 horas UTC do dia 11 e término às 21 horas do dia 12 de abril, totalizando 24 horas de existência.

FIGURA 6 – CONJUNTO DE NUVENS-TERREMOTO AVISTADO NO CANAL WV DO GOES-15 NO DIA 11/04/17 ÀS 21 HORAS (a); DIA 12/04/17 ÀS 00 HORAS (b); 12 HORAS (c); 15 HORAS (d); 18 HORAS (e); E 21 HORAS UTC (f).



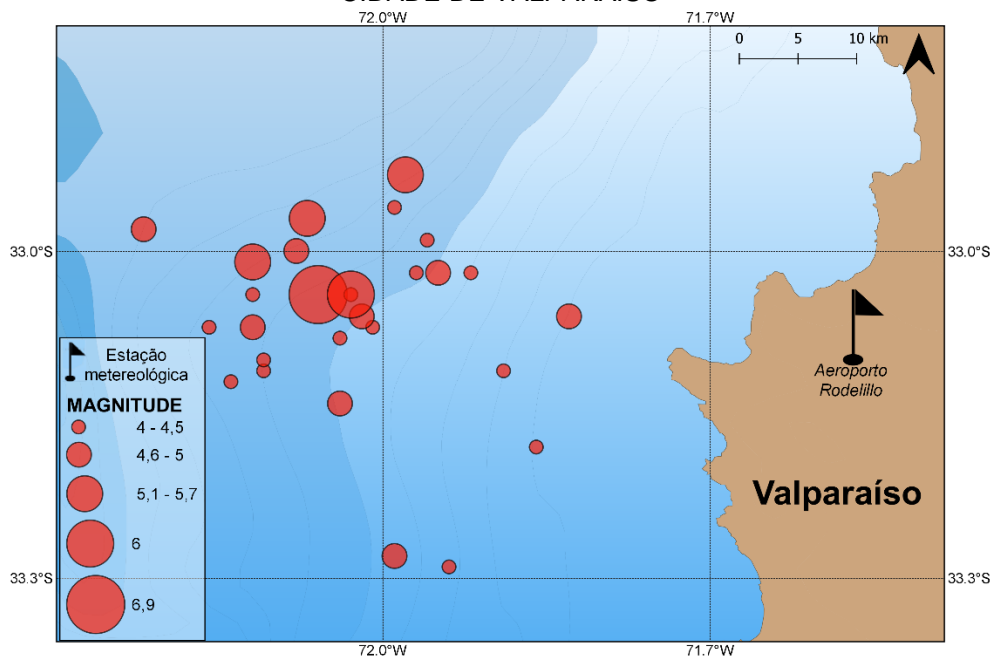


O símbolo + e o quadrado vermelho indicam a localização do epicentro ($33^{\circ}04'S$, $72^{\circ}04'O$); e as flechas mostram o deslocamento e posição das Nuvens-terremoto. FONTE: Adaptado de DU.

Este mesmo formato de Nuvens-terremoto foi registrado por Shou e Fang (2016), no Nordeste do Oceano Pacífico no dia 15 de janeiro de 2013, predizendo seis terremotos de magnitudes entre 4,1 e 4,6 próximos ao Canadá entre os dias 25 de fevereiro e 20 de março.

À vista disso, foi ampliada a busca por terremotos de magnitude ≥ 4 na área de Valparaíso, gerando um resultado de vinte e nove tremores entre os dias 23 e 24 de abril, como mostra a FIGURA 7.

FIGURA 7 – DISPOSIÇÃO DOS TERREMOTOS OCORRIDOS ENTRE 23 E 24/04 PRÓXIMOS A CIDADE DE VALPARAÍSO



FONTE: A autora (2018).

Além do conjunto de Nuvens-terremoto visto pelas imagens de satélite, os dados horários de temperatura atmosférica do Aeroporto Rodelillo registraram uma temperatura anormal no dia 12 de abril, sendo o quesito II de acordo com a classificação de Shou (2011). A FIGURA 8 mostra um pico de temperatura às 14 horas GMT, quando vai de 14°C para 20°C e depois 18°C num intervalo de três horas.

FIGURA 8 – VARIAÇÃO HORÁRIA DA TEMPERATURA NO DIA 12/04/17.



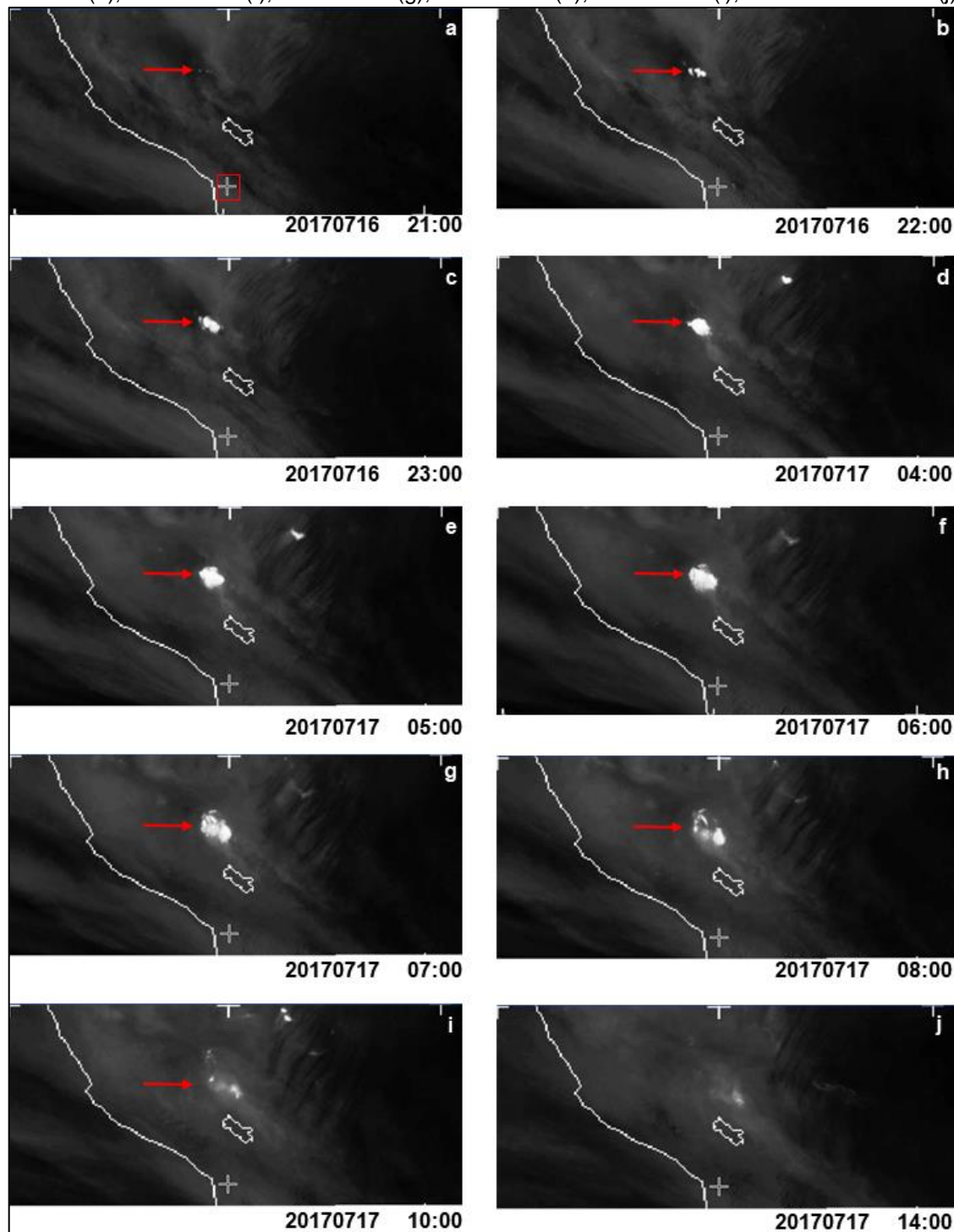
FONTE: A autora (2018).

Para este evento sísmico em particular, as autoridades chilenas ordenaram uma retirada preventiva de pessoas da área costeira próxima a Valparaíso, em caso de um tsunami. No entanto, a Marinha chilena e o Centro de Alerta de Tsunami do Pacífico informaram posteriormente que o tremor não deveria causar um tsunami. Além disso, dos vinte e sete tremores secundários registrados pelo USGS, ao menos dois, de magnitudes 5 e 5,4 na escala Richter, puderam ser sentidos na capital Santiago (O'BRIEN, 2017).

4.3 D - TERREMOTO DO DIA 10 DE OUTUBRO

No dia 16 de julho foi avistada no canal WV uma Nuvem-terremoto próxima ao local do terremoto de magnitude 6,3 que ocorreria oitenta e sete dias depois. Esta, permaneceu fixa por 18 horas (FIGURA 9), duração que corrobora com a classificação empírica de Shou (2006), onde um vapor contínuo de aproximadamente 24 horas prediz um terremoto de magnitude 6 na escala Richter.

FIGURA 9 – NUVEM-TERREMOTO REGISTRADA PELO CANAL WV DO GOES-15 NO DIA 16/07/17 ÀS 21 HORAS (a); 22 HORAS (b); 23 HORAS (c); DIA 17/07/17 ÀS 04 HORAS (d); 05 HORAS (e); 06 HORAS (f); 07 HORAS (g); 08 HORAS (h); 10 HORAS (i); E 14 HORAS UTC (j).

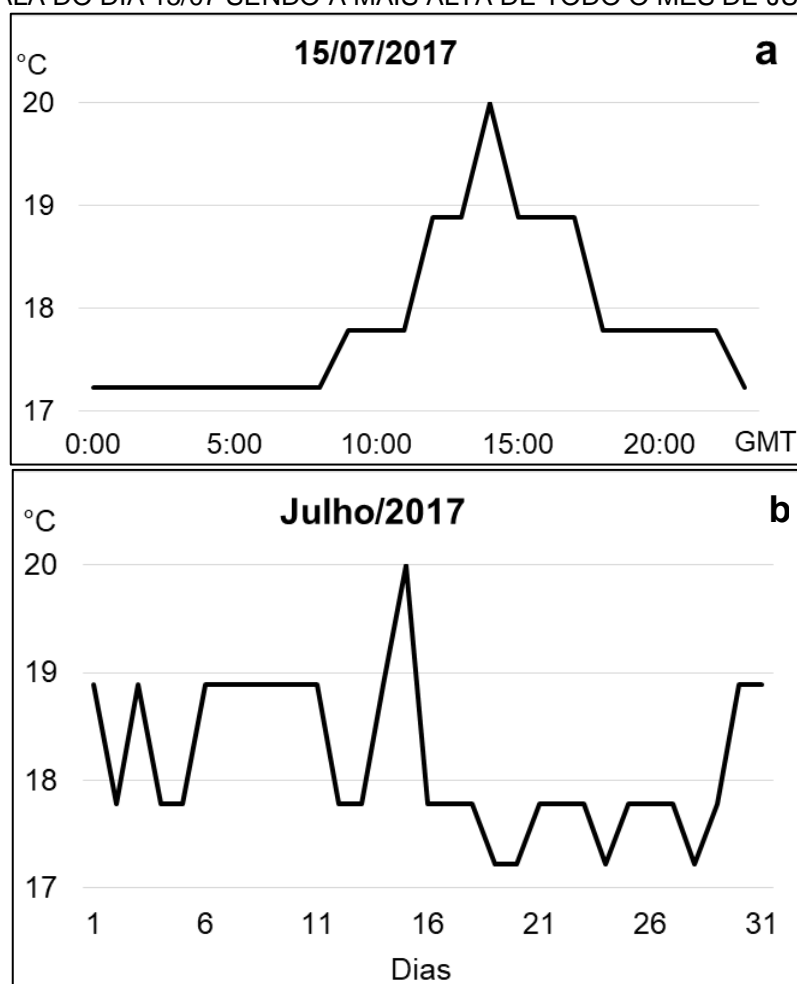


O símbolo + e o quadrado vermelho indicam a localização do epicentro ($18^{\circ}57'S$, $69^{\circ}75'O$), e a flecha mostra posição da Nuvem-terremoto. FONTE: Adaptação de DU.

Os dados horários de temperatura atmosférica registrados pelo Aeroporto Internacional de Chacalluta mostram uma acentuada elevação da temperatura que pode ser compreendida pelos quesitos II e III seguindo a classificação de Shou (2011). No caso II espera-se que a tendência em temperaturas horárias apresente um pulso,

o que pode ser constatado na FIGURA 10(a), quando a temperatura máxima chega a 20°C às 14 horas GMT do dia 15 de julho. Além disso, esta máxima diária de 20°C é a mais alta do mês de julho (FIGURA 10b), abordado pelo quesito III.

FIGURA 10 – TEMPERATURA ANÔMALA REGISTRADA NO DIA 15/04/17 (a) E TEMPERATURA ANÔMALA DO DIA 15/07 SENDO A MAIS ALTA DE TODO O MÊS DE JULHO (b).



FONTE: A autora (2018).

A característica fixa da Nuvem-terremoto e a temperatura anômala antes do fenômeno são fatores também observados por Shou e Fang (2016) na previsão do terremoto de magnitude 6 do dia 28 de setembro de 2004 em Parkfield. Os autores notaram que a Nuvem-terremoto permaneceu sobre o sul da Califórnia entre os dias 16 e 17 de junho, enquanto a temperatura anômala foi constatada no dia 12 de junho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos procedimentos adotados nesta pesquisa foi possível identificar quatro Nuvens-terremoto sobre o território chinelo. As nuvens avistadas respeitaram as características descritas por Shou e Fang (2016), ou seja, a curta duração, o formato singular, o aparecimento e o desaparecimento repentino dentro da janela de tempo proposta de 112 dias antecedentes a data do terremoto.

Dos quatro eventos selecionados, três fenômenos foram comprovados com ocorrência da temperatura anômala, enquanto somente um, mesmo que avistado, não possuiu corroboração com os dados de temperatura. Desse modo, conclui-se que a aplicação do Modelo Vapor-terremoto para os terremotos de magnitude ≥ 6 ocorridos no Chile no ano de 2017 obteve 75% de eficácia.

Em particular, o evento sísmico A mostra que o Vapor-terremoto aparece de forma distinta nos diferentes comprimentos de onda. Uma vez que o vapor não é constatado em uma banda específica, salienta-se a necessidade de analisar as imagens satelitais em todas as bandas possíveis.

A previsão de abalos sísmicos é de grande importância para a sociedade e estudos relacionados a esses métodos de predição devem ser fomentados. Para isso, Shou (2011) propõe um ajuste na limitação artificial atual de 60°C para temperatura máxima registrada na Terra, com o aumento deste valor seria possível identificar um bocal de Vapor-terremoto em liberação, ou um epicentro iminente em aquecimento, para uma evacuação populacional eficaz.

Além disso, evidentemente, a utilização de tecnologia espacial tem sido essencial para o desenvolvimento de um método de previsão de terremoto com base em precursores atmosféricos, uma vez que as imagens de satélite são a forma mais prática para obter a cobertura global. No entanto, segundo Harrington e Shou (2005), o objetivo dos estudos sofre algumas limitações, entre elas a de que muitas Nuvens-terremoto e Geoerupções provavelmente são perdidas devido aos seus tempos de vida serem entre 30 minutos e 10 horas. Associado a isso, a quantidade de tempo necessário para a busca visual de imagens de satélite para precursores atmosféricos limita seriamente o número de previsões de sismo que podem ser feitas por um único indivíduo. Para aplicar este método de previsão para uma grande fração da população mundial será exigido o desenvolvimento de sistemas e de técnicas automáticas de

processamento de imagens de satélite, já adaptados para identificar o vapor quente surgindo em um epicentro iminente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHUMADA, R. B.; PINTO, L.; CAMUS, P. A. The Chilean coast. In: **Sheppard CRC (ed) Seas at the millenium: an environmental analysis**. Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, p: 699–717, 2000.

ÁVILA, A. M. H. **Estimativa de Precipitação em regiões tropicais utilizando imagens do satélite GOES 12**. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

BENÍTEZ, A. Características climáticas y geológicas de Chile. In: ESPINOZA, G.; PISANI, P.; CONTRERAS, I. Perfil ambiental de Chile. **Comisión Nacional del Medio Ambiente**, Santiago, Chile, p: 19–37, 1994.

BHARGAVA, N.; KATIYAR, V. K., SHARMA, M. L.; PRADHAN, P. Earthquake prediction through animal behavior: a review. **Indian Journal of Biomechanics: Special Issue**, p. 159 – 165, mar. 2009.

BRITISH BROADCASTING CORPORATION (BBC). **Os 10 terremotos mais potentes e com maior número de mortos da história da América Latina**. 2017. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-41380495>>. Acessado em: 7 de novembro de 2018.

BROWN, J. H.; LOMOLINO, M.V. **Biogeography**. Sinauer Associates: Massachusetts, 1998.

CAMUS, P. A. Biogeografia marina de Chile continental. **Revista Chilena de Historia Natural**. V: 74, p: 587–617, 2001.

CUSSAC, T.; CLAIR, M. A.; ULTRÉ-GUERARD, P.; BUISSON, F.; LASSALLE-BALIER, G.; LEDU, M.; ELISABELAR, C.; PASSOT, X.; REY, N. The Demeter microsatellite and ground segment. **Planetary and Space Science**, v. 54, n. 5, p: 413–427, mar. 2006.

DERBLI, M. Quando a terra treme. **ComCiência**, Campinas, n. 117, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **GOES – Geostationary Operational Environmental Satellite**. 2013. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_goes.html>. Acesso em: 20 nov. 2018.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

GORNY, V.I.; SALMAN, A.G.; TRONIN, A.A.; SHILIN, B.B. The Earth outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity. **Proceeding of the Academy of Sciences**

of the USSR, 301. p. 67–69, 1988.

GRANT, R. A.; HALLIDAY, T.; BALDERER, W. P.; LEUENBERGER, F.; NEWCOMER, M.; CYR, G.; FREUND, F. T. Ground water chemistry changes before major earthquakes and possible effects on animals. **Internacional Journal os Envirinmental Research and Public health**, v. 8, n. 6, p: 1936-1956, jun. 2011.

GUANGMENG, G.; JIE, Y. Three attempts of earthquake prediction with satellite cloud images. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 13, p: 91-95, jan. 2013.

GUO, W., WANG, B. Cloud anomaly before Iran earthquake. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 7, p: 1921–1928, abr. 2008.

MADARIAGA, R. Sismicidad de Chile. **Física de la Tierra**, n: 10, p: 221–258, 1998.

MORAES, E. C. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2002.

O'BRIEN, R. Forte terremoto atinge costa do Chile, sem relatos de danos graves. **Reuters**. Disponível em: < <https://br.reuters.com/article/topNews/idBRKBN17Q2GE-OBRTTP>>. Acesso em: 14 nov. 2018.

PEREIRA, R. A.; FERREIRA, W. G.; BEZERRA, A. D. S. **Abalos sísmicos no Brasil e no mundo**. Vitória: CREA-ES, 2008.

SHOU, Z. Earthquake clouds, a reliable precursor. **Science & Utopya**, v. 64, p: 53-57, 1999.

SHOU, Z.; FANG, Y. **Earthquake Vapor Model & Precise Prediction**. Seattle, WA, Wenying Shou, 2016.

SHOU, Z.; HARRINGTON, D. Earthquake Vapor, a reliable precursor. **Geophysical Reaserch Abstracts**, New York, v. 7, n. 1, p. 2-3, 2005.

SHOU, Z. **Method of precise earthquake prediction and prevention of mysterious air and sea accidents**. United States Patent: 80689885. 3 fev. 2011.

SHOU, Z. Precursor of the largest earthquake of the last forty years. **New Concepts in Global Tectonics Newsletter**, n. 41, p: 6-15, 2006.

TASSINARI, C. C. G.; DIAS NETO, C. de M. Tectônica global. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 97-112.

TIBOLA, B. G. **O impacto das catástrofes naturais na economia e processo de reconstrução econômica**. 71 f. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Setor de Ciências Humanas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Foreshocks, aftershocks - what's the difference?**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/faqs/foreshocks-aftershocks-whats-difference?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products>. Acessado em: 26 de março de 2013.

VILLAGRÁN, C. El Cuaternario en Chile: evidencias de cambio climático. In: **Argollo J & Ph Mourguiart** (eds) Cambios cuaternarios en América del Sur, p: 191–214, 1995.

ANEXO 1 – IMAGENS DAS NUVENS-TERREMOTO DISPONIBILIZADAS POR SHOU E FANG (2016)

IMAGENS NUVENS LINEARES SIMILARES AO EVENTO A

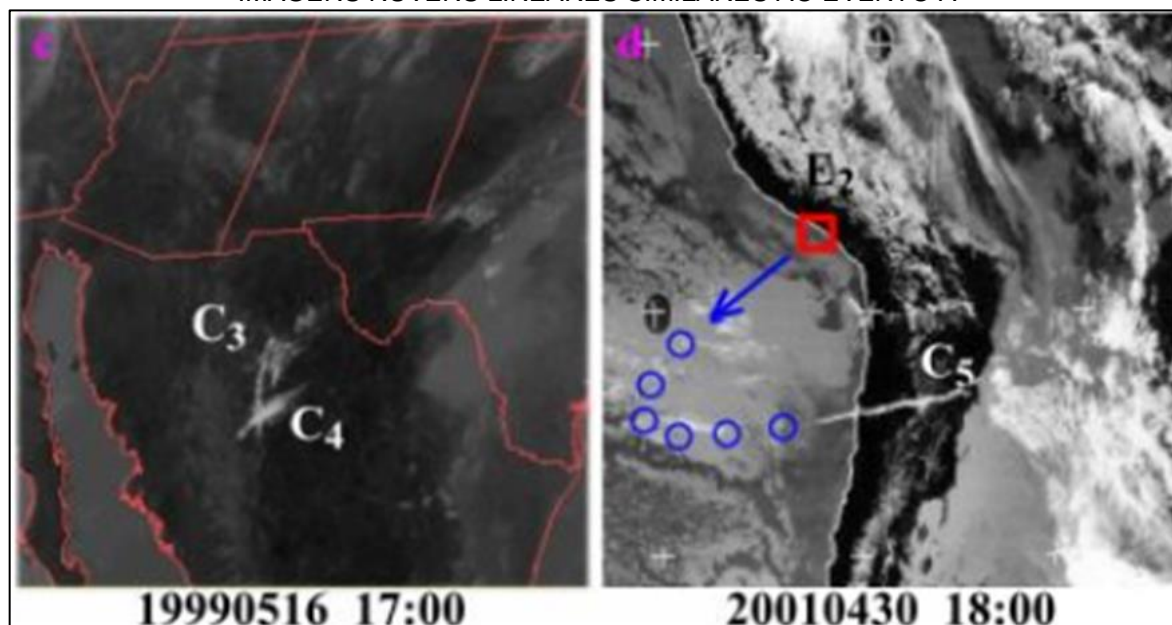


IMAGEM DE UM CONJUNTO DE NUVENS-TERREMOTO SEMELHANTE AO EVENTO B e C

