

PROBABILIDADE DE EVENTO NA-TECH CONDICIONADA A LIMAR DE PRECIPITAÇÃO

José Carlos de Moura Xavier, Wilson Cabral de Sousa Junior
ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil

José Carlos de Moura Xavier
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, Brasil

RESUMO

Evento na-tech é aquele em que a perda de contenção de substância perigosa decorre de evento natural, como terremoto, raio ou precipitação. Na região costeira do estado de São Paulo, precipitação elevada, propensão a escorregamentos e concentração industrial sugerem a possibilidade de eventos na-tech, com possíveis danos ao ambiente e ao ser humano. Estimativas apropriadas desses danos e das probabilidades dos eventos na-tech podem ser incorporadas a uma avaliação quantitativa de risco (AQR) tradicional. Este trabalho aborda a vertente probabilística desses eventos apresentando método para estimar a probabilidade condicional de ocorrência de um evento na-tech dado que certo valor de precipitação possa ser excedido. Então, aplica o método a uma série regionalizada de precipitações derivada de 14 postos de medição presentes no município de Cubatão (SP) e no seu entorno.

1. INTRODUÇÃO

Evento envolvendo a perda de contenção de substância perigosa decorrente de evento natural é conhecido na literatura científica por evento na-tech, do inglês *natural and technological*. Publicações recentes [1,2] destacam a origem do termo no trabalho de Showalter e Myers [3,4], que o empregaram em pesquisa sobre a percepção das agências de gerenciamento de emergências dos 50 estados americanos (Estados Unidos da América) quanto à relação entre desastres naturais e emergências tecnológicas. Ao longo do texto, discutindo os resultados da pesquisa, as autoras empregaram o termo evento na-tech quando se referiam à ocorrência de evento natural (terremoto, furacão, inundação, tornado) e o efeito secundário da liberação para o ambiente de substância química perigosa, inclusive de origem nuclear, fazendo clara distinção entre evento natural, evento tecnológico e evento na-tech [5].

O olhar sobre o efeito direto (ou primário) no ser humano de eventos naturais intensos prevalece na literatura científica, nos bancos de dados oficiais e nos meios de comunicação. Menos presente é o olhar sobre o efeito indireto (ou secundário), que tem a participação da atividade industrial. Inundações, escorregamentos e terremotos, entre outros, podem se tornar desastres pelo efeito direto no ser humano. Esse efeito pode ser ampliado devido à liberação para o ambiente de substâncias perigosas utilizadas na atividade industrial, atingindo os meios ar, água e solo e, eventualmente, o ser humano [6].

Na costa sudeste do Brasil, que inclui os estados do Rio de Janeiro, São Paulo e parte do Espírito Santo e do Paraná e é a mais acidentada do litoral brasileiro, foram registradas precipitações anuais médias de 1100mm a 1500mm, com máximas anuais acima de 4000mm no litoral paulista. As encostas cobertas por floresta tropical e com sobreposição de solos estão sujeitas à erosão intensa [7,8].

Na região costeira de São Paulo, nos municípios de Cubatão, Guarujá, Santos e São Sebastião, há terminais marítimos de produtos químicos, de petróleo e derivados, indústrias químicas, de fertilizantes, siderurgia e uma refinaria de petróleo, além de rede de dutos que liga as indústrias aos terminais.

Precipitação elevada, propensão a escorregamentos e concentração industrial sugerem a possibilidade de eventos na-tech na região costeira de São Paulo. Aliando-se a esse cenário a presença de diversos rios e de intensa ocupação humana, é razoável antever danos ao ser humano e ao ambiente (o efeito indireto já mencionado) decorrentes desses eventos.

Estimativas apropriadas desses danos e das probabilidades dos eventos na-tech podem ser

incorporadas a uma avaliação quantitativa de risco (AQR) tradicional – aquela na qual as hipóteses acidentais advêm predominantemente de falhas humanas e de equipamentos. Este trabalho aborda a vertente probabilística desses eventos e visualiza atribuir seus resultados a hipóteses na-tech.

O objetivo deste trabalho é apresentar método para estimar a probabilidade condicional de ocorrência de um evento na-tech dado que certo valor de precipitação possa ser excedido e aplicar o método a uma série regionalizada de precipitações.

2. DESCRIÇÃO

A subseção 2.1 apresenta o método para estimar a probabilidade de ocorrência de um evento na-tech dado que certo limiar de precipitação foi excedido. O método depende da data de ocorrência dos eventos na-tech e do modelo de distribuição de probabilidade da precipitação. A identificação dos eventos e o desenvolvimento do modelo encontram-se nas subseções 2.2 e 2.3, respectivamente. A subseção 2.4 mostra o procedimento de obtenção da precipitação média (ou regionalizada) para essa bacia a partir de medições de postos dentro da bacia e no seu entorno. O desenvolvimento das subseções 2.3 e 2.4 é limitado e direcionado para a aplicação do método da subseção 2.1. O detalhamento consta em [9].

2.1 Evento Na-Tech Condicionado à Intensidade da Precipitação

A probabilidade de ocorrência de um evento na-tech condicionada à ocorrência de precipitação maior que um limiar h_0 [$P(N = 1 | h > h_0)$] pode ser visualizada na figura 1, que representa o espaço amostral dos valores de h e os valores de h quando ocorrem eventos na-tech, entre eles aqueles quando $h > h_0$.

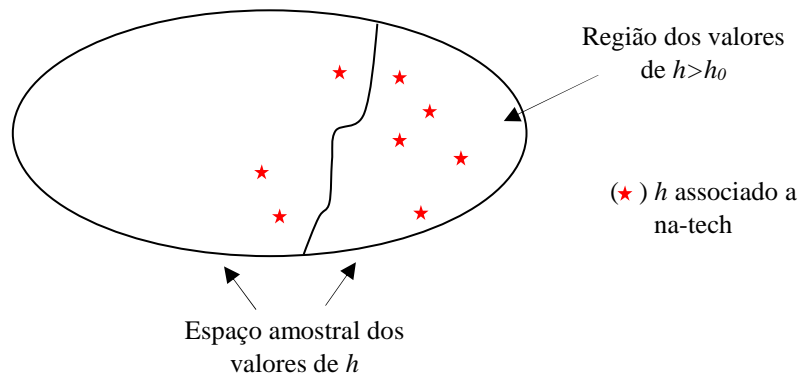


Figura 1 – Representação da estimativa de probabilidade de ocorrência de evento na-tech condicionada ao limiar de precipitação h_0 [$P(N = 1 | h > h_0)$]

Essa probabilidade condicional pode ser expressada pela equação 1.

$$[P(N = 1 | h > h_0)] = \frac{N}{M} P(h > h_0) \quad (1)$$

onde N é número de eventos na-techs associado a cada $h > h_0$, M é o número de valores de precipitação $> h_0$ e $P(h > h_0)$ advém da equação 2.

$$P(h > h_0) = \frac{n}{N^*} (1 - FDA_{h \neq 0}) \quad (2)$$

onde N^* representa o número de medições da variável h , n representa o número de medições da variável h diferentes de zero e $FDA_{h \neq 0}$ a função de distribuição acumulada do modelo em análise (neste trabalho Gama, Weibull e Pearson tipo 3) para $h \neq 0$.

Para cada evento na-tech, deve-se identificar os valores de precipitação (h_0) do dia da sua ocorrência e os valores em $\pm 96h$. Deve-se atribuir a cada evento na-tech o maior valor de precipitação observado no intervalo $\pm 24h$ da data da sua ocorrência. A razão está em como ocorreu o registro das medições de precipitação. De acordo com [10], a medição informada para certo dia representa o acumulado entre as 7h do dia anterior e as 7h do dia considerado.

Disponer os valores de h_0 atribuídos a cada evento na-tech em ordem decrescente em tabela como a apresentada a seguir. As colunas subsequentes são (i) número de eventos na-tech associado a cada $h > h_0$, (ii) número de valores de precipitação (M) $> h_0$, (iii) ponderação N a M , (iv) probabilidade de que h exceda h_0 e (v) probabilidade condicional de ocorrência de evento na-tech dado que o limiar h_0 foi excedido.

h_0 (mm)	N	M	N/M	$P(h > h_0)$	$P(N = 1 h > h_0)$

2.2 Eventos Na-Tech e as Séries de Precipitação

O método apresentado na subseção 2.1 requer a data de ocorrência dos eventos na-tech. Identificar esses eventos, principalmente os ocorridos em passado distante, requer investigação minuciosa de bancos de dados de acidentes utilizando palavras-chave indiretas, por exemplo associando a ocorrência ao efeito observado, tal como extravasamento. A razão é a ausência nesses bancos de chave de pesquisa que permita recuperar imediatamente o evento na-tech ou ainda sua causa, a natural. Essa limitação está vinculada às estratégias de gerenciamento de eventos naturais e tecnológicos que se desenvolveram em paralelo e não convergiram para a identificação dos eventos na-tech, seja no Brasil [11] seja na Europa ou nos Estados Unidos da América [12,13].

A identificação desses eventos na região costeira do estado de São Paulo para o período 1940-2015 consta de [5]. A razão para 1940 foi poder investigar a presença de eventos na-tech anteriormente a 1955, data do início da operação da Refinaria Presidente Bernardes (RPBC). Entre 1940 e 1955 havia poucas indústrias nessa região, quatro ou cinco em Cubatão. Com o início da operação da RPBC, ocorreu intensa industrialização em Cubatão nas décadas de 1960 e 1970 e estabilização no número de empresas a partir da década de 1980. Além da intensa presença de indústrias, outra razão para a escolha do período foi a disponibilidade de medições de precipitação a partir de 1936.

Foram identificados 15 eventos nos municípios de Cubatão, Praia Grande, Santos e São Sebastião [5]. Para expressar a probabilidade de ocorrência de evento na-tech, delimitou-se a quantificação aos registros de Cubatão. A razão é o número maior de registros (dez) em um só município e as características dos eventos naturais iniciadores (inundações e escorregamentos) decorrentes predominantemente de precipitação.

Dada essa delimitação, foram identificados 14 postos pluviométricos em Cubatão e em municípios próximos, identificados no quadro 1 e localizados na figura 2. Para os postos, estavam disponíveis medições de altura pluviométrica 24h.

Quanto à extensão, as séries são distintas. As de Bertioga, Santos e São Vicente abrangeram o período da pesquisa, qual seja janeiro de 1940 a dezembro de 2015, ou 76 anos, com algumas interrupções. Guarujá se assemelhou às anteriores. Já Cubatão tem séries que variaram de 21 anos a 61 anos, com interrupções. No período de março de 1972 a março de 1982, há medições em Cubatão em seis dos sete postos, com pequenas interrupções. Todas as séries, a despeito das suas extensões, apresentaram interrupções, como apresentadas no quadro 1, coluna número de medições.

Quanto à qualidade, há medições consistidas entre 1958 e 1992.

2.3 Análise das Séries Temporais de Precipitação

A seguir, breve descrição do procedimento adotado para o tratamento probabilístico das 14 séries.

O comportamento de cada série foi examinado por meio de modelos probabilísticos seguindo abordagem tradicional baseada em frequência e presente em [14,15,16]. O raciocínio subjacente foi encontrar diferenças relevantes, que impedissem o uso de alguma série.

Quadro 1 – Características dos postos pluviométricos (adaptado de [10])

Município	Posto		Coordenadas		Altitude (m)	Extensão da série	Número de medições	Medições consistidas
	Prefixo	Nome	latitude	longitude				
Bertioga	E3-040	Usina Itatinga	23°46'00"	46°07'00"	10	01/1940 a 12/2015	27696	01/1958 a 12/1992
	E3-042	Represa Itatinga	23°45'00"	46°08'00"	720	01/1940 a 12/2015	27660	01/1970 a 12/1991
Cubatão	E3-038	Piaçaguera	23°52'00"	46°23'00"	5	01/1940 a 10/2000	21226	01/1972 a 12/1992
	E3-101	Cubatão	23°53'00"	46°25'00"	6	07/1944 a 12/1999	17030	01/1969 a 12/1992
	E3-104	Terceiro Plano Serra Nova	23°48'00"	46°19'00"	670	11/1960 a 03/1982	7302	01/1972 a 12/1975
	E3-143	Rodovia Anchieta (cota 400)	23°53'00"	46°29'00"	400	01/1950 a 04/1994	16052	01/1970 a 12/1991
	E3-144	Morro do Piche	23°53'00"	46°27'00"	105	11/1949 a 05/1989	8959	Não consta
	E3-153	Curva da Onça	23°53'00"	46°29'00"	500	09/1952 a 10/1996	13893	01/1958 a 12/1991
	E3-236	Pilões	23°54'00"	46°30'00"	100	03/1972 a 03/1992	7282	03/1972 a 12/1991
Guarujá	E3-043	Perequê	23°57'00"	46°11'00"	3	04/1942 a 12/2015	24762	01/1970 a 12/1970 e 01/1972 a 12/1992
	E3-070	Ponta da Praia	24°00'00"	46°17'00"	3	01/1941 a 12/2015	25222	01/1970 a 12/1992
Santos	E3-041	Caetê	23°53'00"	46°13'00"	200	01/1940 a 12/2015	27038	01/1970 a 12/1991
São Vicente	E3-056	São Vicente	23°58'00"	46°22'00"	10	01/1940 a 12/2015	23552	01/1969 a 12/1991
	E3-228	Humaitá	23°57'16"	46°27'00"	10	01/1940 a 12/2015	21291	01/1972 a 12/1992

Entre esses modelos, as distribuições Gama e Weibull, biparamétricas, e Pearson tipo 3 são hábeis em representar a distribuição das medições de altura pluviométrica 24h, caracterizada pela presença de caudas superior e inferior. As caudas são observadas em histogramas, elaborados a partir do procedimento proposto por [17].

O método de máxima verossimilhança [18] foi adotado na estimativa dos parâmetros das distribuições a partir dos valores amostrais [15,19]. Quando há medições nulas (zeros) na amostra, seus logaritmos tornam-se $-\infty$ e a solução para o método não pode ser calculada. Kite [20] discutiu diferentes alternativas para zeros na amostra, entre elas a presente em [21], aqui adotada.

A aderência dos modelos aos dados foi verificada pelos métodos Chi-quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling. A escolha da distribuição que melhor representa as medições seguiu abordagem similar à de [14]. Para x_1, x_2, \dots, x_n , comparou-se os valores da função de distribuição acumulada observada com os das funções teóricas das distribuições Gama, Weibull e Pearson tipo 3. A distribuição escolhida foi a que apresentou maior proximidade com a função observada, com prioridade para as caudas.

2.4 Regionalização das Medições de Precipitação

A regionalização decorreu da limitação das séries dos sete postos de medição de Cubatão ao período 1940-2000, com interrupções. Por outro lado, havia medições no período de 1940 a 2015 em outros sete postos no entorno da bacia do rio Cubatão, que permitiriam ter estimativas para todo o período da pesquisa.

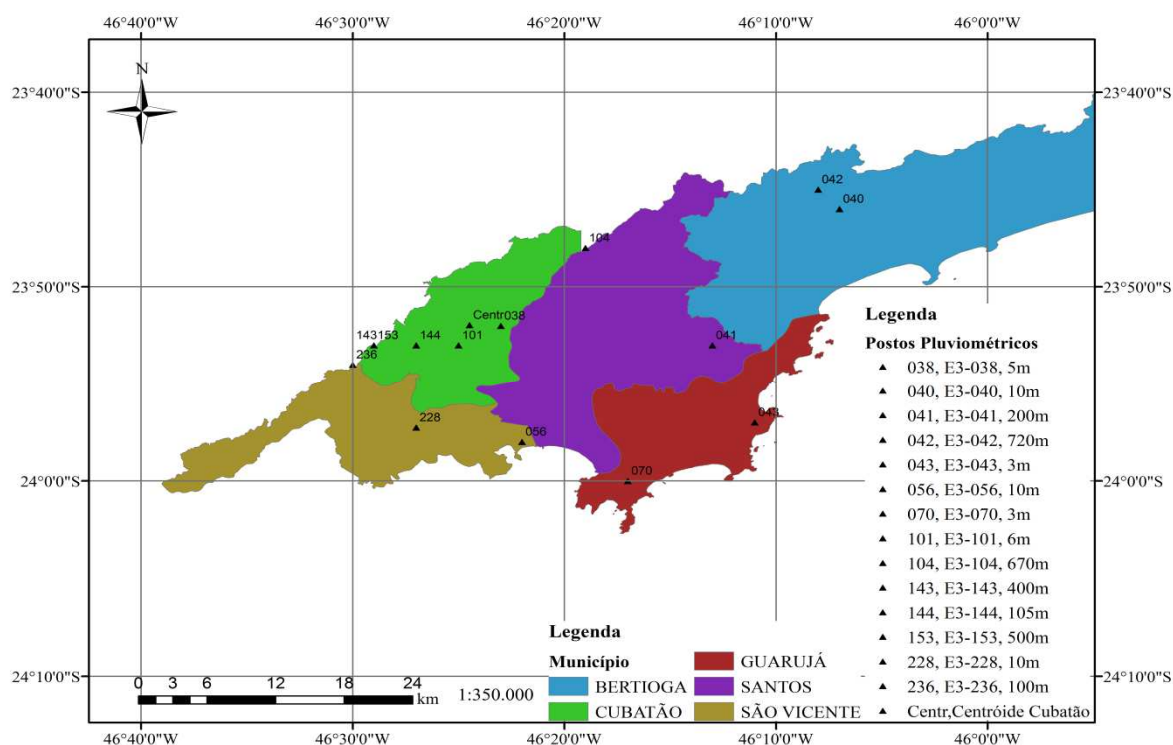


Figura 2 – Localização dos postos pluviométricos

Segundo [22], o processo de transferência de parâmetros de bacias monitoradas para outra de interesse (em geral não monitorada) é conhecido como regionalização.

Merz e Blöschl [23] compararam oito métodos de regionalização e apontaram melhor performance daqueles baseados em proximidade espacial, quando comparados a métodos baseados nos atributos das bacias.

Entre os métodos de proximidade, [24] propôs estimar a precipitação média de uma bacia a partir da combinação linear dos valores de precipitação dos postos de medição próximos. O peso de cada posto foi derivado a partir da rede de polígonos de Thiessen. Os polígonos foram determinados traçando-se linhas unindo os postos próximos e suas mediatrizes. A interceptação das mediatrizes entre si e com o limite da bacia determina o conjunto de polígonos e, consequentemente, a área de influência de cada posto [25]. Como princípio, o método assume que em qualquer ponto da bacia a precipitação é a mesma do posto de medição mais próximo [22].

Conhecendo-se o comportamento individual das 14 séries (subseção 2.3), obteve-se a série representativa do período 1940-2015, ou série regionalizada, utilizando-se o método polígonos de Thiessen [24], com auxílio de software de informações geográficas. A razão é seu amplo uso no Brasil na regionalização de variáveis hidrológicas, além da sua simplicidade operacional e matemática.

O método foi aplicado à bacia do rio Cubatão em razão da localização dos postos de medição no seu interior ou nas suas cercanias. Também, por conter boa parte (i) das empresas onde ocorreram os eventos na-tech e (ii) da área urbana do município. A bacia tem área aproximada de 501km², delimitada a partir de imagem disponível no DATAGEO [26], sistema de infraestrutura de dados espaciais ambientais do estado de São Paulo, gerido pela Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente.

Obtida a série regionalizada, os parâmetros das distribuições Gama, Weibull e Pearson tipo 3 foram estimados por máxima verossimilhança, a aderência dos modelos às medições regionalizadas foi verificada e a distribuição que melhor se ajustou a essas medições foi identificada, de acordo com a subseção 2.3.

3. DISCUSSÃO

A partir da comparação entre os valores da função distribuição acumulada observada e das funções

teóricas, estimados a partir do método apresentado na subseção 2.3, a distribuição Weibull mostrou melhor ajuste a 11 das 14 séries. Além de apresentar maior número de quantis em que as funções observada e teórica mais se aproximaram em relação às demais distribuições, esses quantis estão predominantemente nas caudas, notadamente na superior, indicando melhor ajuste da distribuição Weibull nessas regiões. Os comportamentos dos postos E3-043 e E3-070, de Guarujá, e E3-041, de Santos, são mostrados em [9], juntamente com o raciocínio que suportou a adoção da distribuição Weibull como a de melhor ajuste às suas medições. Após análise individual das 14 séries, não houve evidência que indicasse diferença relevante entre as suas distribuições.

3.1 Série Regionalizada de Precipitações

A série representativa do período 1940-2015 ou série regionalizada decorreu do procedimento descrito na subseção 2.4. A título de exemplo, a tabela 1 mostra a precipitação regionalizada estimada para janeiro de 1940, quando seis postos de medição estavam operando.

Tabela 1 – Precipitação regionalizada para janeiro de 1940

Data	E3-038	E3-040	E3-041	E3-042	E3-056	E3-228	Precipitação regionalizada
01.01.1940	0	0	0	5	0	0	0,2
2	0	0	3,7	16	3	0	3,1
3	5,1	7,9	0	0	0	0	0
4	0	2,3	24,1	0	1,2	0	9,6
5	0	0	2,4	5	0	0	1,1
6	0	41,5	0	0	0	0	0
7	114,3	9	8,7	4,2	25	0	11,1
8	116,9	103,2	101,8	6,5	184	206	150,4
9	7,6	5	54,1	16	68	43,2	53,7
10	5,1	2,3	14,2	65,5	1	2,8	9,5
11	0	3,8	4,7	6	16,5	7,2	9
12	0	12,3	0	0	1	0,1	0,3
13	0	6,2	0	0	3,6	8,4	3,3
14	0	0	0	0	7,5	0,1	2,3
15	0	0	30,4	0	0	0	11,6
16	0	0	0	0	0	0	0
17	0	4,5	0	0	0	0	0
18	30,5	16,2	0,3	0	2,1	1,1	1
19	5,1	6,8	29,1	0	20,2	22,1	23,2
20	0	0,3	3,3	0	1,5	0	1,7
21	0	0,5	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0,2	0	0	0	0	0
24	0	5	0	0	0	0	0
25	10,2	12	6,2	18	6,8	0	5,3
26	0	9	8,5	0	4,8	9	7,1
27	0	0	0,6	0	0	1,2	0,6
28	10,2	10	0	0	0	0	0
29	0	0	17,1	0	0	0	6,5
30	15,2	34,2	0	0	0	0	0
31.01.1940	17,8	0,2	29,1	0	12	0	14,8

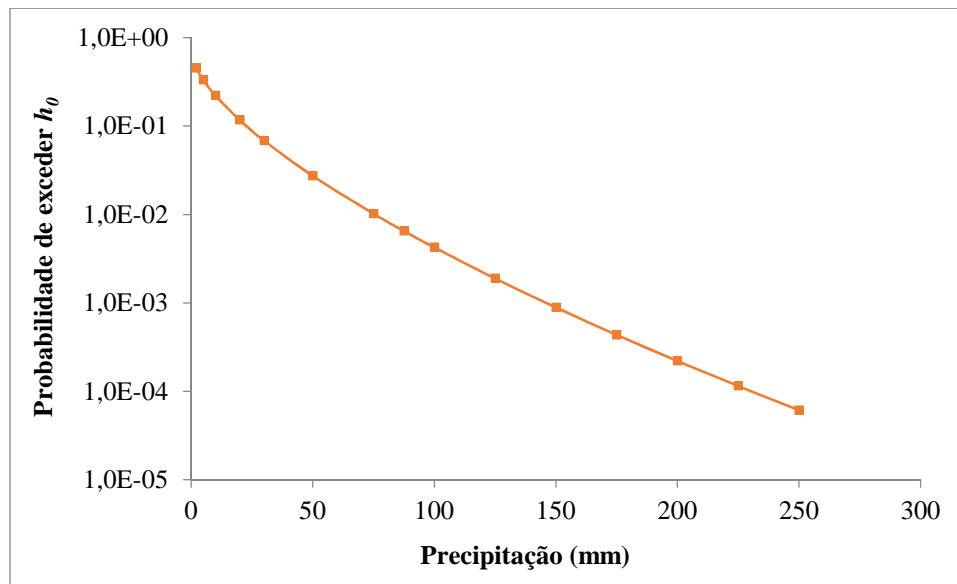
Legenda: E3-XXX Posto pluviométrico E3-XXX

A distribuição Weibull apresentou o melhor ajuste à série, notadamente nas caudas. A tabela 2 apresenta os parâmetros α e β da distribuição Weibull para a série regionalizada e a figura 3 traz a sua curva de $P(h>h_0)$ obtida a partir da equação 3.

$$P(h > h_0) = 0,663 e^{-0,2364x^{0,6649}} \quad (3)$$

Tabela 2 – Valores dos parâmetros α e β da distribuição Weibull para a série regionalizada

Denominação	Zeros (%)	Medições \neq zero	Parâmetro	
			α	β
Medições regionalizadas	33,7	18399	0,2364	0,6649

Figura 3 – Probabilidade de exceder $[P(h > h_0)]$ baseada na distribuição Weibull para a série regionalizada

3.2 Evento Na-Tech Condicionado à Intensidade da Precipitação Regionalizada

Os valores de precipitação do dia da ocorrência do evento na-tech e os valores em $\pm 96h$ estão na tabela 3 e advêm da série regionalizada das medições de precipitação. Exceto no evento na-tech CUB 01, o maior valor coincide com a data de ocorrência do evento na-tech ou 24h após.

Tabela 3 – Precipitação regionalizada (h , mm) para o dia da ocorrência de evento na-tech (0h) e intervalo de $\pm 96h$

	Na-tech	(96h)	(72h)	(48h)	(24h)	0h	24h	48h	72h	96h
1	CUB 15	2	2,9	0	9,4	24	213,7	29,4	24,9	1
2	CUB 01	22	0,5	122,2	113	5,9	5,6	1,6	3,3	4,4
3	CUB 02	17,5	0	0,4	6,8	60	14,4	0	0	0
4	CUB 03	0	19,9	2,5	40,4	160,9	40,9	0,1	0	53,9
5	CUB 04	0,2	5,4	22,8	0,1	149,2	167	6,2	0,1	0,9
6	CUB 05	0,7	1,2	2,1	0,1	8,7	24,1	0,6	71,8	115,7
7	CUB 06	72,9	74,4	15,7	20,8	39,5	85,4	3,9	4,5	22,4
8	CUB 07	50,6	29,7	47,1	17,2	23,2	5,8	8,4	12,8	23,6
9	CUB 08	0	0,2	0,2	0	0,5	191,1	4,4	2,1	0,3
10	CUB 09	0	60,7	11,7	0	27	136,1	6,4	0,7	4,1

O evento na-tech CUB 01 refere-se ao rompimento de duto e liberação de amônia para atmosfera. Sua descrição em [5] menciona a “movimentação do solo decorrente das últimas chuvas”. Verificando os relatos anteriores a 25.01.1985, data do evento, há o registro de intensas chuvas a partir de 23.01.1985. Assim, embora se tenha assumido na subseção 2.1 atribuir a cada evento na-tech o maior valor de precipitação observado no intervalo $\pm 24h$ da data da ocorrência, adotou-se a estimativa de 48h antes, ou seja, 122,2mm para representar a precipitação associada ao evento na-tech CUB 01. A razão é a evidência de que o rompimento está associado a precipitações que ocorreram em período maior que 24h.

Na tabela 4, as três colunas à esquerda trazem (i) as estimativas de precipitação (h_0) provenientes da tabela 3, em ordem decrescente, (ii) o número de eventos na-tech associado a cada $h > h_0$ e (iii) o número de vezes em que precipitação (M) $> h_0$. A quarta coluna pondera N a M . Por exemplo, para $h_0 = 85,4\text{mm}$, há 184 medições (M) $> h_0$, sendo que em seis delas (3,26%) ocorreu um evento na-tech (N). A ponderação N/M é essencial no estabelecimento da probabilidade condicional de ocorrência de evento na-tech, pois mostra que nem toda vez em que $h > h_0$ ocorre evento na-tech.

Tabela 4 – Probabilidade de ocorrência de evento na-tech condicionada a limiar de precipitação h_0

h_0 (mm)	N	M	N/M	$P(h > h_0)$	$P(N = 1 h > h_0)$
213,7	0	4	0,00E+00	1,54E-04	0,00E+00
191,1	1	9	1,11E-01	2,80E-04	3,11E-05
167	2	16	1,25E-01	5,45E-04	6,81E-05
160,9	3	19	1,58E-01	6,48E-04	1,02E-04
136,1	4	38	1,05E-01	1,34E-03	1,42E-04
122,2	5	52	9,62E-02	2,06E-03	1,98E-04
85,4	6	184	3,26E-02	7,02E-03	2,29E-04
60	7	520	1,35E-02	1,82E-02	2,45E-04
24,1	8	2721	2,94E-03	9,33E-02	2,74E-04
23,2	9	2850	3,16E-03	9,79E-02	3,09E-04

A quinta coluna da tabela 4 traz as probabilidades de h exceder h_0 , valores esses obtidos a partir da distribuição Weibull com parâmetros da tabela 2. A sexta coluna traz a probabilidade condicional de ocorrência de evento na-tech dado que o limiar h_0 foi excedido (equação 1).

A sexta coluna da tabela 4 indica valores de probabilidade de ocorrência de evento na-tech em queda à medida que o limiar h_0 aumenta. Essa tendência é coerente com a ocorrência de precipitações elevadas, cuja probabilidade de exceder cai rapidamente à medida que aumenta h_0 (observar figura 3).

4. CONCLUSÃO

Expressar a probabilidade de ocorrência de evento na-tech condicionada a limiares de precipitação permite pensar em utilizá-la, com algum cuidado, na Avaliação Quantitativa de Risco (AQR), em substituição à frequência de perda de contenção de um reservatório decorrente de inundação.

Como dito, deve-se ter algum cuidado ao extrapolar os resultados de precipitação para inundação. Embora a correlação seja intuitiva, há fatores que promovem uma inundação, como ações antrópicas (ocupação do solo próximo às empresas, canalizações e modificações dos cursos dos rios, construções de pontes e viadutos), mas é pouco provável que modifiquem o padrão de distribuição das precipitações.

Outro cuidado é verificar a ocorrência de inundação mediante certo limiar de precipitação. Intuitivamente, nem toda precipitação intensa, mesmo em valores elevados, leva a uma inundação. Esse tipo de dependência foi observada ao se investigar eventos na-tech e precipitações. Como mostra a subseção 3.2, a relação entre a ocorrência do evento na-tech e o limiar de precipitação não é 1:1. Por exemplo, a tabela 4 indica que em 52 vezes em que $h > 122,2\text{mm}$, identificou-se cinco eventos na-tech. Consequentemente, ao se discutir uma hipótese acidental associada a esse nível de precipitação, a frequência do evento na-tech deve ser fatorada por 5/52.

A probabilidade condicional mostrada na tabela 4 pode ser utilizada nos processos de decisão das empresas e dos órgãos licenciadores. Para as empresas, podem auxiliar na localização do novo

empreendimento ou no gerenciamento do existente. Para o órgão licenciador, trata-se de resultado importante na ampliação do escopo da AQR, ainda que as métricas dessa ferramenta não contemplem os impactos a outros bens ambientais que não o ser humano, porém observados nos eventos na-tech identificados.

Essa estimativa é aplicável a Cubatão e seu entorno. Contempla as características geográficas, hidrológicas e de ocupação territorial locais. Estender a estimativa para outras regiões não é recomendável. O método sim. Este deve nortear outras estimativas, preferencialmente de âmbito local ou regional, de forma que reflitam as características próprias das regiões.

5. REFERÊNCIAS

- [1] SENGUL, H et al. "Analysis of Hazardous Material Releases Due to Natural Hazards in the United States". *Disasters*, vol.36, n.4, p. 723. (2012).
- [2] SALZANO, E. et al. "Public Awareness Promoting New or Emerging Risks: Industrial Accidents Triggered by Natural Hazards (NaTech)". *Journal of Risk Research*, v.16, n.3-4, p. 469. (2013).
- [3] SHOWALTER, P.S.; MYERS, M.F. "Natural Disasters as the Cause of Technological Emergencies: a Review of the Decade 1980-1989". Working paper 78. *Natural Hazards Research and Applications Information Center*. Institute of Behavioral Science. University of Colorado. (1992).
- [4] SHOWALTER, P.S.; MYERS, M.F. "Natural Disasters in the United States as Release Agents of Oil, Chemicals, or Radiological Materials Between 1980-1989: Analysis and Recommendations". *Risk Analysis*, v.14, n.2, p. 169. (1994).
- [5] XAVIER, J. C. de M.; SOUSA JUNIOR, W. C. de "Na-techs no Litoral do Estado de São Paulo: Diagnóstico no Período 1940-2015". *Congresso ABRISCO 2017*. ABRISCO (Associação Brasileira de Análise de Risco, Segurança de Processo e Confiabilidade), Rio de Janeiro, Brasil. (2017). Disponível em: <<https://modal.cetesb.sp.gov.br/portal/>>. Acesso em: 27 set. 2019.
- [6] KRAUSMANN, E. et al. "Industrial Accidents Triggered by Natural Hazards: an Emerging Risk Issue". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v.11, p. 921. (2011).
- [7] Ab'SÁBER, A. N. *Os Domínios de Natureza do Brasil: Potencialidades Paisagísticas*. P. 47, 49, 60. 3ª ed. Ateliê Editorial. São Paulo, Brasil. (2005).
- [8] Ab'SÁBER, A. N. *Litoral do Brasil*. P. 9, 32, 176. Metalivros. São Paulo, Brasil. (2005).
- [9] XAVIER, J. C. de M. *Riscos de Eventos NaTech sob Mudanças Climáticas na Região Costeira do Estado de São Paulo*. (2017). Tese de Doutorado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Brasil. P. 16, 62. Disponível em: http://www.bdata.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=74078>. Acesso em: 27 set. 2019.
- [10] SÃO PAULO (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Banco de Dados Hidrológicos*. (2019). Disponível em: <<http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br>>. Acesso em: 27 set. 2019.
- [11] XAVIER, J. C. de M.; SOUSA JUNIOR, W. C. de. "Recognising Na-tech Events in Brazil: Moving Forward". *Natural Hazards (Dordrecht)*, v.82, p. 493. (2016).
- [12] GALDERISI, A.; CEUDECH, A.; PISTUCCI, M. "A Method for Na-Tech Risk Assessment as Supporting Tool for Land Use Planning Mitigation Strategies". *Natural Hazards*, v.46, p. 221. (2008).
- [13] KRAUSMANN, E; BARANZINI, D. "Natech Risk Reduction in the European Union". *Journal of Risk Research*, v.15, n.8, p. 1027. (2012).

- [14] YUE, S. et al. "The Gumbel Mixed Model for Flood Frequency Analysis". *Journal of Hydrology*, v.226, p. 88. (1999).
- [15] GUL, O. G. et al. "Nonstationarity in Flood Time Series". *Journal of Hydrologic Engineering*, v.19, p. 1349. (2014).
- [16] CABALLERO W. L.; RAHMAN, A. "Development of Regionalized Joint Probability Approach to Flood Estimation: A Case Study for Eastern New South Wales, Australia". *Hydrological Processes*, v.28, p. 4001. (2014).
- [17] STURGES, H. A. "The Choice of a Class Interval". *Journal of the American Statistical Association*, v.216, n.153, p. 65. (1926).
- [18] SOONG, T. T. *Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers*. P. 287. Wiley. USA. (2004).
- [19] MADSEN, H. et al. (Editores). *A Review of Applied Methods in Europe for Flood-Frequency Analysis in a Changing Environment*. Centre for Ecology & Hydrology. (2013). Disponível em: <<http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/501751/7/N501751CR.pdf>>. Acesso em 27 set. 2019.
- [20] KITE, G. W. *Frequency and Risk Analyses in Hidrology*. 2ª impressão. Water Resources Publications. Michigan, USA. (1978).
- [21] JENNINGS, M. E.; BENSON, M. A. "Frequency Curves for Annual Flood Series with Some Zero Events or Incomplete Data". *Water Resources Research*, v.5, n.1, p. 276. (1969).
- [22] BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M. "Scale Issues in Hydrological Modelling: A Review". *Hydrological Processes*, v.9, p. 251. (1995).
- [23] MERZ, R; BLÖSCHL, G. "Regionalisation of Catchment Model Parameters". *Journal of Hydrology*, v.287, p. 95. (2004).
- [24] THIESSEN, A. H. "Precipitation Averages for Large Areas". *Monthly Weather Review*, v.39, p. 1082. (1911). Disponível em: <<ftp://ftp.library.noaa.gov/docs.lib/htdocs/rescue/mwr/039/mwr-039-07-1082b.pdf>>. Acesso em: 27 set. 2019.
- [25] COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. *Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais*. P. 61. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Porto Alegre, Brasil. (2013).
- [26] SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. *Sub-bacias hidrográficas do Estado de São Paulo*. 2019. Disponível em: <<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/?ctx=DATAGEO>>. Acesso em: 27 set. 2019.