

Aplicação da Dinâmica de Sistemas para Prevenção de Desastres Hídricos: Um Estudo na Cidade de Blumenau

Application of System Dynamics for Water Disaster Prevention: A Study in the City of Blumenau

Eduarda Dutra de Souza

Doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina

Mestra em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina

E-mail: eduardadutradesouza@gmail.com

Jaqueline Carneiro Kerber

Mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina

Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental Pela Universidade Federal de Santa Catarina

E-mail: Jaqueckerber@gmail.com

Mauricio Uriona Maldonado

Doutor em Engenharia e Gestão do Conhecimento pela Universidade Federal de Santa Catarina

E-mail: mauricio.uriona@gmail.com

Carlos Manuel Taboada Rodriguez

Doutorado em Ökonom Ingenieur Technische Universität Dresden

E-mail: carlos.taboada@ufsc.br

Marina Bouzon

Doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina

E-mail: marinabouzon@gmail.com

Endereço: Eduarda Dutra de Souza

Universidade Federal de Santa Catarina R. Eng.
Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade,
Florianópolis - SC, 88040-900 Brasil.

Endereço: Jaqueline Carneiro Kerber

Universidade Federal de Santa Catarina R. Eng.
Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade,
Florianópolis - SC, 88040-900 Brasil.

Endereço: Mauricio Uriona Maldonado

Universidade Federal de Santa Catarina R. Eng.
Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade,
Florianópolis - SC, 88040-900 Brasil.

Endereço: Carlos Manuel Taboada Rodriguez

Universidade Federal de Santa Catarina R. Eng.
Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade,
Florianópolis - SC, 88040-900 Brasil.

Endereço: Marina Bouzon

Universidade Federal de Santa Catarina R. Eng.
Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade,
Florianópolis - SC, 88040-900 Brasil.

Editor-Chefe: Dr. Tonny Kerley de Alencar Rodrigues

Artigo recebido em 28/08/2019. Última versão recebida em 12/09/2019. Aprovado em 13/09/2019.

Avaliado pelo sistema Triple Review: a) Desk Review pelo Editor-Chefe; e b) Double Blind Review (avaliação cega por dois avaliadores da área).

Revisão: Gramatical, Normativa e de Formatação

RESUMO

A dinâmica de sistema proporciona a solução de problemas complexos e dinâmicos como é o caso dos desastres naturais. Dentro das classificações de desastres, há os eventos que são cíclicos e que ocorrem com certa frequência. Devido a isso, a presente pesquisa procura proporcionar um embasamento sobre a área de operações humanitárias e posterior por meio da dinâmica de sistema trabalhar um dos desastres cíclicos que mais causam impactos no Brasil. Sendo assim, a pesquisa foca em um estudo de caso sobre enchentes e alagamentos no município de Blumenau –SC, local conhecido e marcado por inúmeras enchentes ao longo dos anos. Deste modo, elaborou-se a simulação da situação atual e identificou-se o local onde devem ser investidos tempo, esforço e dinheiro para diminuir a probabilidade de incidência deste desastre. O principal resultado encontrado é o impacto causado pela drenagem urbana no funcionamento do sistema. Além disso, entregou-se um modelo causal da área de operações humanitárias e identificação de pesquisas futuras.

Palavras-chaves: Operações Humanitárias. Dinâmica de Sistemas. Enchentes.

ABSTRACT

System dynamics provide the solution to complex and dynamic problems such as natural disasters. Within disaster classifications are events that are cyclic and occur with some frequency. Because of this, the present research seeks to provide a basis on humanitarian operations and later through the system dynamics to work one of the most disastrous cyclical disasters in Brazil. Thus, the research focuses on a case study on flooding and flooding in the municipality of Blumenau - SC, a place known and marked by numerous floods over the years. Thus, we simulated the current situation and identified the place where time, effort and money should be invested to decrease the likelihood of this displacement. The main result found is the impact caused by urban drainage on the system functioning. In addition, a causal model of humanitarian operations and identification of future research was delivered.

Key words: Humanitarian Operations. System Dynamics. Floods.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas vêm ocasionando cada vez mais desastres ambientais que afetam as cidades e, assim, um grande número de pessoas, impactando de forma indireta na economia local. Devido a este cenário, o planeta está passando por mudanças no ciclo hidrológico causadas pelo aquecimento global, o que ocasiona uma acentuação dos riscos pré-existentes, tais como inundações, deslizamentos de terra, ondas de calor e limitações de fornecimento de água potável (SIEBERT, 2017). Essas mudanças climáticas impulsionam os problemas de ordem social, ambiental e econômica pré-existentes de cada região. O desenvolvimento de operações humanitárias (como as de apoio à água, saneamento, saúde) torna-se necessário devido ao contexto de locais e regiões vulneráveis e muitas vezes remotas (BESIOU; MARTINEZ; WASSENHOVE, 2014)

A ação humanitária é composta por 4 grandes fases: mitigação, preparação, resposta e reabilitação (MESSER, 2003; DIEDRICHS; PHELPS; ISIHARA, 2016; BESIOU *et al.*, 2011). A mitigação é a adaptação de determinado lugar para o desastre, já a preparação corresponde às medidas tomadas para garantir uma resposta eficiente. Desse modo, resposta corresponde a decisões tomadas logo após o desastre (MESSER, 2003). Por fim, reabilitação é o processo de recuperação da área. A área mais defasada da operação humanitária é a falta de planejamento anterior ao desastre (KOBRA; RAMESH; ARSHINDER, 2015), isto é, as fases de mitigação e preparação.

A fim de atacar essa barreira e melhorar a eficiência, um foco tanto acadêmico quanto profissional na implementação de preparação para desastres é necessário (KUNZ; REINER; GOLD, 2014; DURAM; GUTIERREZ; KESKINOCAK, 2011) por meio da utilização de estudos de caso (KOVACS; MOSHTARE, 2018). É nesta fase que ocorre a definição de todas as atividades que podem ser realizadas pelos poderes governamentais, organizações e população (KUNZ; REINER; GOLD, 2014) com intuito de reduzir os impactos causados pelo desastre. Além disso, a necessidade crítica de estabelecer um plano de preparação para limitar as baixas e danos facilita o processo de recuperação após o desastre (DIAZ; KUMAR; BEHR, 2015).

O Brasil é um país em desenvolvimento que enfrenta problemas do tipo hidrológico que acarreta uma necessidade de investimento, preparação e respostas para estes desastres. Esse tipo de problema é a segunda maior ocorrência do país, perdendo apenas para estiagem e seca (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2018) - problemas já atacados pela metodologia de dinâmica de sistema. Os desastres hidrológicos aumentaram 3,9% de 1990 para os anos 2000,

além disso 32% da população é afetada tanto pelas enxurradas e inundações, sendo responsável pelo maior número de mortes por desastre de 58,15% para enxurrada e 13,4% para inundações (CEPED, 2013). O Ministério da Saúde Brasileiro (2018) afirma que a região Sul (região no qual encontra-se o estado de Santa Catarina, foco do presente estudo) é a região que mais apresenta esse tipo de desastre, com 76,7% de seus municípios que registraram estado de emergência reconhecido pelo Governo Federal.

Segundo a Casa Civil, o Brasil vem buscando e se preparando para desastres (CASA CIVIL, 2013), como a criação do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), mas ainda é um caminho muito longe, já que esse tipo de desastre continua a ser pauta nos principais jornais do país. Um dos motivos são as promessas de investimento na área de preservação, monitoramento e resposta não serem totalizadas pelo Governo Federal (FOLHA, 2018). Segundo o portal de transparência do Brasil (2019), percebe-se uma diminuição gradativa dos investimentos na área, o que salienta a necessidade de investimentos e políticas precisas.

Assim sendo, o problema tem características complexas (difícil solução), por ser dinâmico (o fator tempo influencia) e com necessidade de ser estudado. De acordo com o cenário apresentado, o presente artigo propõe aplicar a Dinâmica de Sistemas (DS) para identificar ações para desastres do tipo cíclico em uma aplicação em estudo de caso. O uso desta ferramenta justifica-se, pois há necessidade de um sistema inter-relacionado em todo o setor humanitário, de modo que possa entender e prever o efeito das mudanças no sistema ao longo do tempo (BESIOU; STAPLETON, 2011). Segundo esses autores, esta área apresenta também um comportamento complexo para implementação e coordenação eficiente de suas atividades, apresentando uma característica que outros métodos, como redes de filas, não conseguem abordar toda a complexidade que o sistema dinâmico possibilita (KUNZ; REINER; GOLD, 2014), reforçando assim a utilização da ferramenta.

Deste modo, escolheu-se essa ferramenta para solucionar o problema complexo e dinâmico das inundações catarinenses em forma de um estudo de caso. O artigo é dividido em 5 partes que têm como objetivo mapear o ambiente, propor modelo e aplicá-lo. O trabalho ainda apresenta diferentes cenários para compreender o modelo desenvolvido e auxiliar a Defesa Civil Catarinense na escolha de novas políticas públicas para atacar este problema.

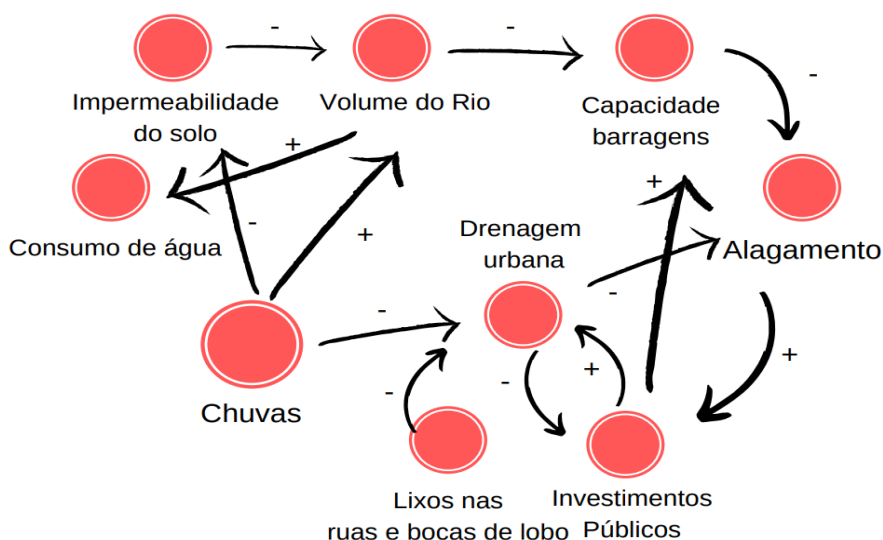
2 MÉTODO DE PESQUISA

O presente artigo iniciou-se com uma pesquisa bibliográfica para mapear os modelos existentes e proporcionar embasamento para a revisão de literatura do tópico 3. A busca foi realizada na base de dados *SCOPUS* e *Web of Science*, com as palavras-chaves no primeiro eixo: *Humanitarian logistics*, *Disasters* e *operations humanitarian*, e no segundo eixo: *system dynamics*. Limitou-se em apenas artigos publicados em *Journals* e posteriormente foram retirados os duplicados, totalizando, assim, 7 artigos. Estes artigos foram analisados em conjunto com outros modelos sistêmicos utilizados na prática de combate ao desastre e apresentados no Tópico 3.1.

Após o embasamento teórico, definiu-se o foco da pesquisa e a ferramenta utilizada, sendo esses: as atividades de identificação de desastres e a simulação sistêmica. A escolha deste método justifica-se devido, em termos gerais, ao contexto humanitário ser classificado como complexo (HEASLIP; SHARIF; ALTHONAYAN, 2012), pois seus problemas não possuem uma fácil resolução. A complexidade dá-se também pelos muitos atores que interagem fortemente entre si e os múltiplos *loops* de *feedbacks* que demonstram causa e efeitos das variáveis analisadas no sistema (BESIOU; STAPLETON, 2011). Já a parte dinâmica aparece devido a este comportamento complexo não conseguir mensurar as causas e efeitos que ocorrem ao longo do tempo, apresentando, assim, uma condição dinâmica e incerta que dificulta a tomada de decisão (BESIOU; STAPLETON, 2011).

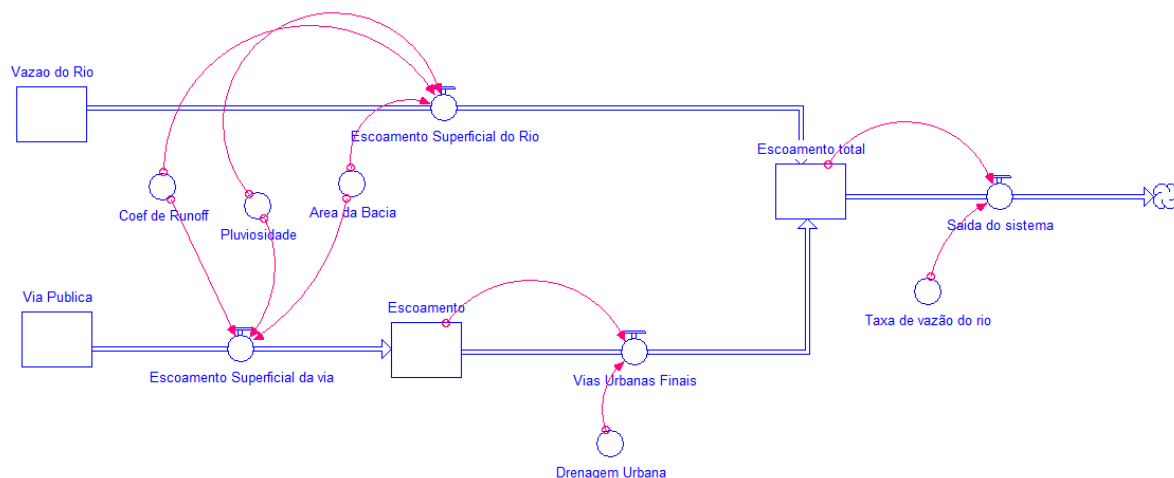
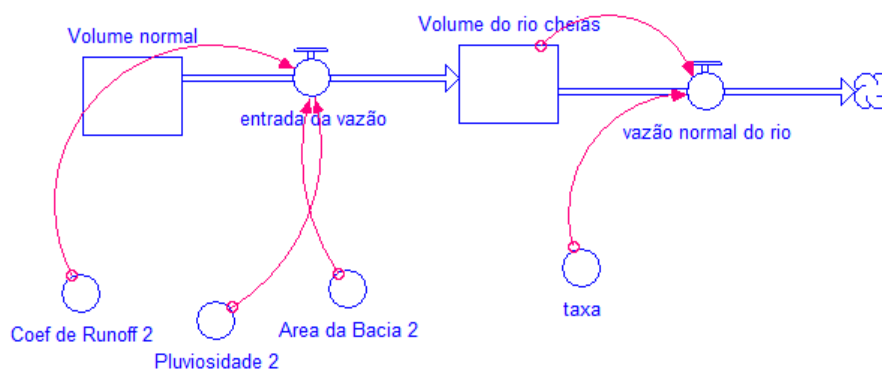
O modelo desenvolvido para este presente estudo iniciou-se com o desenvolvimento do modelo causal para compreensão dos *loops* de *feedback*, que apresenta sucessão de causas e efeitos, de tal forma que uma mudança em uma determinada variável viaja pelo *loop* e volta a afetar a variável inicial (BESIOU; STAPLETON; WASSENHOVE, 2011). Esse modelo causal tem como intuito compreender o sistema no qual será desenvolvido o modelo por meio da dinâmica de sistema (apresentado na Figura 2). Esse modelo pode ser observado na Figura 1 deste presente trabalho. O modelo foi baseado no ciclo da água, nos 7 artigos analisados, nos dados da defesa civil e de acordo com a entrevista realizada com um engenheiro sanitário para sua validação.

Figura 1 - Modelo causal



Os *feedbacks* demonstram as influências que cada variável causa em outra dentro do sistema estudado. Deste modo, percebe-se que as chuvas influenciam quatro outros pontos: consumo de água, impermeabilidade do solo, volume dos rios e drenagem urbana. Os *loops* causais positivos são considerados autorreforços, isto é, quando uma variável cresce, a outra cresce proporcionalmente, como é o exemplo dos Investimentos Públicos ao aumentar o valor investido, melhora a drenagem urbana e a capacidades das barragens. Entretanto, o *loop* negativo é o balanceamento no qual uma variável cresce inversamente proporcional a outra. Continuando no exemplo, ao ter uma drenagem boa (sem chance de alagamentos ou baixa preocupação) os investimentos públicos nessa hora diminuem gradativamente.

Os fluxos de causa-efeito abordados na Figura 1 foram transcritos no software Stella, no qual são realizadas as entradas e saídas do sistema. Deste modo, o modelo faz analogia com o sistema da banheira com entradas, saídas e estoques. Os estoques dos modelos são aqueles dados nos quais acumula água tanto no rio quanto nas vias públicas e os quais são influenciados tanto pela entrada de variáveis quanto pelas saídas. Esses estoques são influenciados na sua entrada por 3 variáveis principais: Coeficiente de *Runoff*, Pluviosidade e Área da Bacia. Já a saída dos estoques são as vias urbanas influenciadas pela variável drenagem urbana (taxa constante que pode ser variada pelo investimento público) e a “saída do sistema” influenciada pela taxa de vazão do rio. Esse sistema é apresentado na Figura 2. Já a Figura 3 apresenta uma simplificação do modelo para análises dos resultados.

Figura 2- Modelo de Simulação 1**Figura 3 - Modelo de Simulação 2**

O modelo desenvolvido, apesar de ser aplicado para região de Blumenau, pode ser replicado para regiões presentes da bacia hidrográfica do Rio Itajaí em Santa Catarina e adaptada para qualquer região, pois primeiro é apresentado um modelo geral (com as causas e efeitos) e posteriormente focou-se nos dados para a cidade Blumenau.

Após a apresentação do método utilizado para a aplicação de políticas (variáveis endógenas), foram gerados cenários e discussões sobre o assunto. Por fim, apresentaram-se sugestões de pesquisa e de aprimoramento do sistema e conclusões finais.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Os desastres provocam todos os anos milhares de vítimas que dependem da ajuda humanitária prestada por governos e organizações para sua sobrevivência (KUNZ; REINER;

GOLD, 2014). As operações humanitárias apresentam diversas dificuldades em sua aplicação como: a avaliação da demanda, atendimento, priorização, distribuição e redistribuição de suprimentos (DIEDRICHS; PHELPS; ISIHARA, 2016) e possuem como principais prioridades: localização de vítimas, cuidados com a saúde e o fornecimento de água, comida e abrigo (KUNZ; REINER; GOLD, 2014).

Esses desastres são classificados como naturais ou antropológicos, sendo este último causado pela ação do homem, como é o exemplo das barragens brasileiras, terrorismo, vazamentos de materiais químicos, incêndio, lixo, nucleares e outros. Os naturais, por sua vez, são classificados como repentinos (terremotos, tsunamis, erupções vulcânicas, deslizamentos de terras) ou cíclicos (enchentes, epidemias, furacões, tufões, secas, fome). As operações humanitárias são divididas em 4 fases: mitigação, preparação, resposta e reabilitação (DIEDRICHS; PHELPS; ISIHARA, 2016). Isto é, as operações humanitárias abrangem todo o ciclo de vida de um desastre e podem ser classificadas em duas grandes divisões, sendo elas: (i) pré-desastre, que é composta pelas fases de mitigação e preparação; e (ii) pós-desastre, que corresponde às fases de resposta e recuperação (AHMADI; SEIFI; TOOTOONI, 2015; ANAYA-ARENAS; RENAUD; RUIZ, 2014; BOONMEE; ARIMURA; ASADA, 2017).

A fase anterior ao desastre é responsável pela busca por minimizar os possíveis impactos (ANAYA-ARENAS; RENAUD; RUIZ, 2014) e realização de ações de prevenção (ÖZDAMAR; ERTEM, 2015). Já a fase posterior ao acontecimento do desastre tem como objetivo a busca pela redução dos efeitos causados pelo desastre, auxiliando a população afetada (ANAYA-ARENAS; RENAUD; RUIZ, 2014) por meio da evacuação da área, prestação de socorros, transporte de vítimas e donativos (ÖZDAMAR; ERTEM, 2015). Essa parte também tem como finalidade a recuperação da área atingida por meio da busca do retorno anterior da comunidade atingida (ANAYA-ARENAS; RENAUD; RUIZ, 2014).

3.1 Modelos existentes e a Dinâmica de Sistema (DS)

A dinâmica de sistema tem como objetivo expandir as fronteiras dos modelos mentais para alongar o horizonte de tempo e assim possamos compreender os padrões comportamentais criados pela estrutura de *feedback* e não apenas os eventos considerados recentes (STERMAN, 2000). Segundo Sterman (2002, p.505), a dinâmica de sistema: “nos ajuda a expandir os limites dos modelos mentais para nos tornamos conscientes e assumirmos a responsabilidade pelos *feedbacks* criados por nossas ações”. Já para Beisou, Martinez e Wassenhove (2014), a dinâmica de sistema é usada para modelar efeitos de longo prazo

(horizonte de simulação) e efeitos de curto prazo (etapa do tempo de simulação) para que possa estudar tanto os efeitos de curto prazo da resposta a desastres quanto os efeitos de longo prazo dos programas de desenvolvimento.

Esse método, então, é utilizado para solucionar adversidades dinâmicas e complexas (FORRESTER, 1971), sendo considerado esse tipo de problema aquele que o ser humano não consegue compreender o comportamento e as influências de variáveis ao longo do tempo no sistema. Forrester (1971) ainda reforça a caracterização do problema e o papel da DS, alegando que: (i) há diversos efeitos ao longo do tempo; (ii) a necessidade de considerar mudanças nas variáveis, isto é, existem variáveis endógenas ao sistema; (iii) a necessidade de conhecer bem o problema e seu funcionamento; e (iv) a DS tem como papel cuidar para não atacar o sintoma e não o real problema, já que isto causará um novo efeito.

A inserção do conceito efeito é dado pelo reconhecimento dos feedbacks presentes no sistema o qual tem como objetivo demonstrar que as ações realizadas causam efeitos colaterais e estes precisam ser considerados para compreender o sistema como um todo. Segundo Ercan, Onat e Tatar (2016), os *feedbacks* têm a capacidade de demonstrar as relações causais possibilitando aproximar-se da realidade. Os feedbacks podem ser positivos ou negativos, os positivos são aqueles cujas variáveis crescem proporcionalmente, enquanto o negativo elas são inversamente proporcionais.

Para compreender na prática a aplicação deste método nas operações humanitárias, o presente artigo apresenta o resultado da pesquisa bibliográfica, o qual apresentou um retorno de 7 modelos de DS neste contexto. No Quadro 1 apresenta-se a compilação desses modelos.

Quadro 1 - Modelos presentes na literatura

Artigo	Ano	Journal	Objeto de estudo
<i>Investing in disaster management capabilities versus pre-positioning inventory: A new approach to disaster preparedness</i>	2014	<i>International Journal of Production Economics</i>	Esta pesquisa objetivou quantificar e comparar os efeitos de três cenários básicos: nenhuma atividade de preparação (Cenário A), investimento em atividades de preparação física (Cenário B, pré-posicionamento de estoques) e investimento em atividades de preparação de intangíveis (Cenário C, investindo em DMC).
<i>Vehicle supply</i>	2014	<i>Production</i>	Este artigo utiliza os resultados de Pedraza-

<i>chains in humanitarian operations: Decentralization, operational mix, and earmarked funding</i>		<i>and Operations Management</i>	Martinez e Van Wassenhove (2013) como parâmetros para modelar cadeias de suprimento de veículos (VSCs) em apoio a operações de campo humanitárias. Focou-se em ambientes descentralizados, examinando todo o conjunto de programas de desenvolvimento e resposta a desastres, e os efeitos específicos do financiamento destinado.
<i>Housing recovery in the aftermath of a catastrophe: Material resources Perspective.</i>	2015	<i>Computers & Industrial Engineering</i>	O uso da modelagem do System Dynamics (SD) neste artigo demonstra o desejo de fornecer uma imagem precisa do processo de reconstrução da moradia.
<i>System dynamics for humanitarian operations</i>	2011	<i>Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management</i>	O artigo obteve seus resultados por meio de estudo de caso para mensurar qual a melhor forma de gerenciamento de frota de veículos de campo, comparando três cenários (híbrido, centralizado e descentralizado). Além disso, o artigo identificou pesquisas futuras usando a metodologia SD.
<i>Quantifying communication effects in disaster response logistics: A multiple network system dynamics model.</i>	2016	<i>Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management</i>	O objetivo deste artigo é fornecer um método para modelar o transporte de diferentes mercadorias de vários fornecedores de ajuda para locais de desastre através de uma rede de capacidade limitada.

<i>Engaging donors in smart compassion: USAID CIDI's Greatest Good Donation Calculator</i>	2015	<i>Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management</i>	O objetivo deste artigo é introduzir uma ferramenta de decisão semelhante a um jogo - “Greatest Good Donations Calculator (GGDC)”, que foi desenvolvida em colaboração por acadêmicos da Universidade de Rhode Island e do Centro de Informações sobre Desastres Internacionais da USAID.
<i>Employing a systems-based perspective to the identification of inter-relationships within humanitarian logistics</i>	2012	<i>International Journal of Production Economics</i>	Os autores descrevem o uso da técnica de análise e projeto de sistemas (SADT) para explicar como uma coordenação mais eficaz de operações humanitárias por organizações militares e civis envolvidas no alívio de desastres pode ser alcançada em toda a gama de fases do ciclo de vida da ajuda humanitária.

Além desses modelos, encontraram-se em aplicação modelos não convertidos em artigos de Journals, mas de relevância para composição da base teórica do presente estudo, como é o caso do modelo desenvolvido pela defesa civil brasileira para um estudo de caso para estiagem. Este modelo tem como intuito atacar um problema que atinge a parte mais interna e ao oeste do Brasil: seca/estiagem. O estudo de caso é desenvolvido no oeste de Santa Catarina e tem como objetivo efetivar um diagnóstico da evolução dos fatores condicionantes da seca e estiagem no Oeste Catarinense, projetar cenários para o futuro e promover a conscientização das pessoas e comunidades, fortalecendo a sua resiliência, através da identificação e implantação de estratégias de gestão hídrica.

Posteriormente, focou-se apenas em modelos que não abordam logística humanitária, mas utilizam em seus escopos os termos “inundações” e “enxurradas” em modelo de DS. Esses artigos foram utilizados como embasamento para mapeamento dos parâmetros do modelo desenvolvido no presente artigo. O Quadro 2 apresenta o resumo da utilização da DS em cada um dos artigos encontrados.

Quadro 2 - Modelos específicos presentes na literatura 2

ARTIGO	ANO	JOURNAL	OBJETO DE ESTUDO
<i>System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American prairie watershed</i>	2002	<i>Hydrological Processes</i>	Processos hidrológicos nas localizações geográficas onde a principal contribuição para inundações vem do derretimento da neve.
<i>An Intelligent Decision Support System for Management of Floods</i>	2006	<i>Water Resources Management</i>	Tomada de decisão durante as diferentes fases do gerenciamento de inundações.
<i>Real-time forecasting and daily operation of a multireservoir system during floods by linear quadratic Gaussian control</i>	1983	<i>Water Resources Research</i>	Resolver o problema "tático" de regular os reservatórios para minimizar o valor esperado dos danos causados pelas inundações durante um horizonte operacional.
<i>The use of system dynamics simulation in water resources management</i>	2009	<i>Water resources management</i>	Revisão de literatura sobre os recursos híbridos.
<i>Spatial system dynamics: new approach for simulation of water resources systems</i>	2004	<i>Journal of Computing in Civil Engineering</i>	Demonstrar como ocorre uma aplicação para a gestão de inundações na bacia do Rio Vermelho, em Manitoba, no Canadá.
<i>A theory on urban resilience to floods - a basis for alternative planning practices</i>	2012	<i>Ecology and society</i>	Avaliação de vulnerabilidade e mitigação para o sistema ferroviário chinês sob inundações.

O presente artigo diferencia-se dos já encontrados na literatura por tratar de uma aplicação prática em país em desenvolvimento que sofre com este tipo de catástrofe, com objetivo de contribuir para mitigação das inundações e enxurradas na região analisada. Além disso, é o único modelo que aborda realmente o problema em países em desenvolvimento, devido ao artigo aplicado na China não possuir enfoque em desastres e suas operações humanitárias, mas sim no desdobramento urbano.

3.2 PROBLEMA

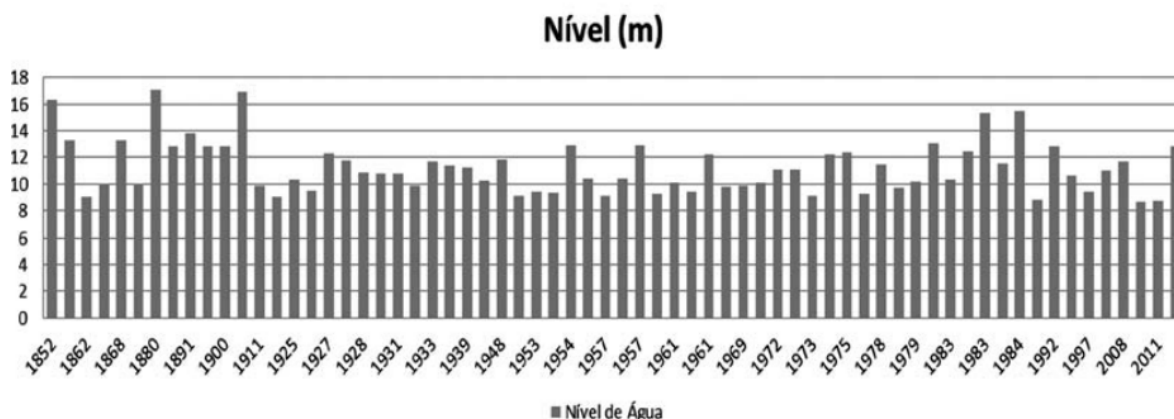
As inundações são denominadas como enchentes que correspondem a elevações das águas de forma paulatina e previsível e se mantêm em situação de cheia durante determinado tempo e, a seguir, escoam-se gradualmente (CASTRO, 2003). Em Santa Catarina, este problema tem uma frequência mensal de desastre por inundação. Entre os anos 1991 e 2012, percebeu-se uma maior incidência no mês de setembro, tendo uma frequência mensal de 102% seguindo pelo mês de maio com 78% e outubro com 62%. Além disso, os danos causados por desastres obtiveram maior quantidade na infraestrutura, conforme Figura 4. Por fim, mapeou-se pelo Atlas de Desastres (2013) do Estado de Santa Catarina o município mais severamente atingido pelas inundações, sendo este Blumenau.

Figura 4 - Danos materiais por desastres de inundação no Estado de Santa Catarina, no período de 1991 a 2012



Fonte: CEPED (2013)

Este município possui população estimada de 309.011 pessoas e “Apresenta 91.6% de domicílios com esgotamento sanitário adequado, 37.7% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 62.6% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada” (IBGE, 2018), isto é, presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio. Apesar disso, ainda há um forte índice de inundações devido à sua bacia hidrográfica, os manejos de águas pluviais são feitos por uma rede coletora do tipo separadora de drenagem urbana e as áreas de risco no perímetro urbano devido a áreas em taludes e encostas sujeitas a deslizamentos e áreas sem infraestrutura de drenagem.

Figura 5 – Nível do rio nas enchentes ao longo da história de Blumenau

Fonte: Paula, Nodari e Espíndula (2014).

Observando a Figura 5, percebeu-se que a última grande enchente ocorreu no ano de 2011, entretanto, observando o registro de enchentes no site da prefeitura do município, há presença de cotas constantes nos últimos anos (ALERTA BLU, 2019) demonstrando que há um indício de necessidades de continuação dos investimentos na fase de pré-desastres. Além disso, cidades próximas banhadas pela mesma bacia hidrográfica apresentaram enchentes constantes como as registradas na região do Rio do Sul em maio de 2019 (NSC, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aplicando o sistema apresentado na Figura 2 e levando em consideração os dados da região apresentados pela Defesa Civil do Município (2019), Laboratório de Oceanografia Física (2008), Alerta Blumenau (2019), Águas SC (2017), Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Itajaí (2010) e a Prefeitura do Município (2017;2019) gerou-se uma série de resultados relevantes para a região analisada. Para compreender esses dados, precisa-se compreender o funcionamento do sistema. O braço da Via Pública inicia-se com valor igual a zero devido a não haver água no sistema inicial, posterior com a chuva (definida pela variável pluviosidade) ocorre o processo de escoamento superficial da via pública criando assim um estoque da água que escoou do sistema. Posteriormente, esse reservatório é reduzido às saídas da Drenagem Urbana (variável influenciada pelas políticas públicas, como limpeza de boca de lobos, pavimentação, áreas verdes, etc). Esse primeiro sistema é somado com o sistema do Rio que traz a vazão do rio, tendo como entrada para sua maximização as chuvas e chegando em um montante ampliado. Esse resultado dos dois sistemas tem como saída a possibilidade ou não de alagamentos/enchentes. Essa saída é influenciada pela taxa de vazão do rio que

pode sofrer variações de acordo com determinadas medidas públicas (tema não abordado neste presente trabalho).

Os dados apresentados na Tabela 1 apresentam a cota de vazão da água de acordo com as horas passadas (com essa média de chuva), isto é, o volume do rio aumenta de acordo com as cotas apresentadas. A média da cota do rio, fornecida pela defesa civil de Santa Catarina (2019), é em média de 1m a 4m, sendo considerado em atenção de 4m a 6m, alerta de 6m a 8m e prontidão (isto é, à beira do desastre) a partir dos 8m, sendo assim considerou-se como valor médio do rio 5m. Além disso, a vazão do rio, considerada como saída de água de forma de consumo.

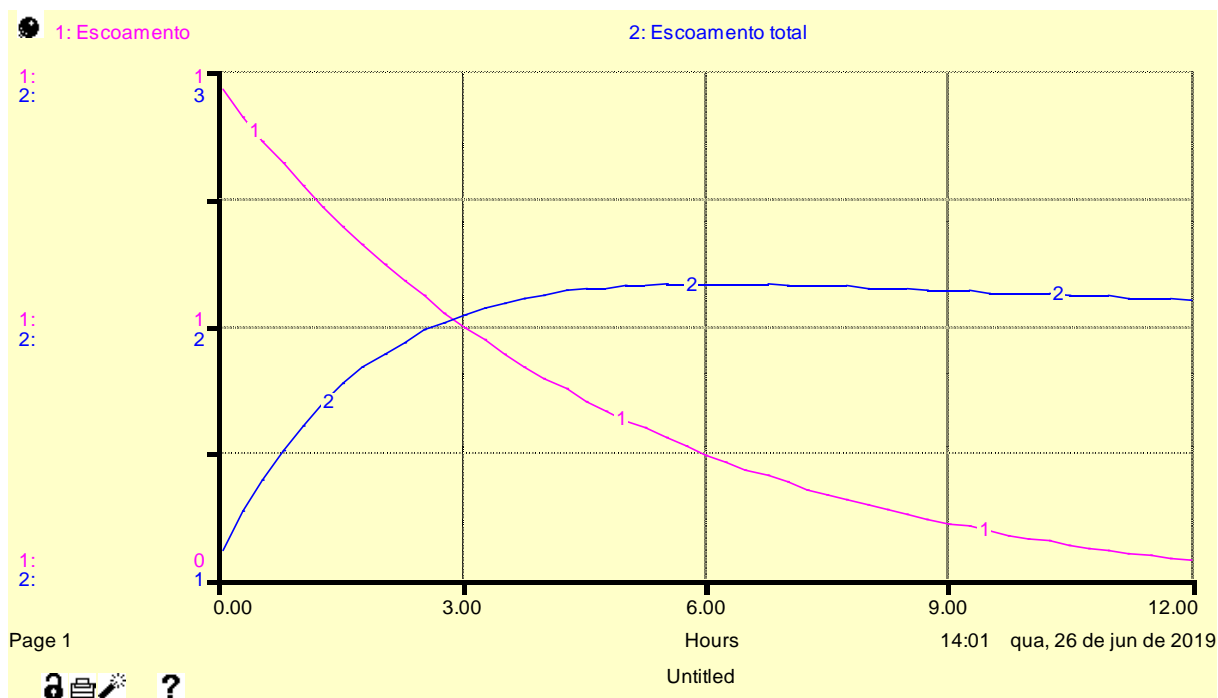
Tabela 1 - Cota do Rio (simulação)

HORA S	COTA DO RIO (0.17mm³ de chuva – média anual)	COTA DO RIO (0.18 mm³ de chuva – média dos períodos de maior incidência)	COTA DO RIO (0.19 mm³ de chuva - maior valor registrado em 2018)
1.00	1.60	1.70	1.79
2.00	1.89	2.00	2.11
3.00	2.04	2.16	2.28
4.00	2.12	2.24	2.37
5.00	2.15	2.28	2.40
6.00	2.16	2.29	2.42
7.00	2.16	2.28	2.41
8.00	2.15	2.27	2.40
9.00	2.14	2.26	2.39
10.00	2.12	2.25	2.37
11.00	2.11	2.23	2.36

Deste modo, percebe-se que o aumento das chuvas de forma constante aumenta a probabilidade de ocorrência de enchentes e alagamentos na região. Os investimentos públicos abordados no presente trabalho (que são aqueles que vêm sendo realizados pela prefeitura em estudo) são direcionados à melhoria da taxa de drenagem urbana. O Gráfico 1 apresenta o comportamento das curvas dos dois principais estoques do sistema, o primeiro é o escoamento

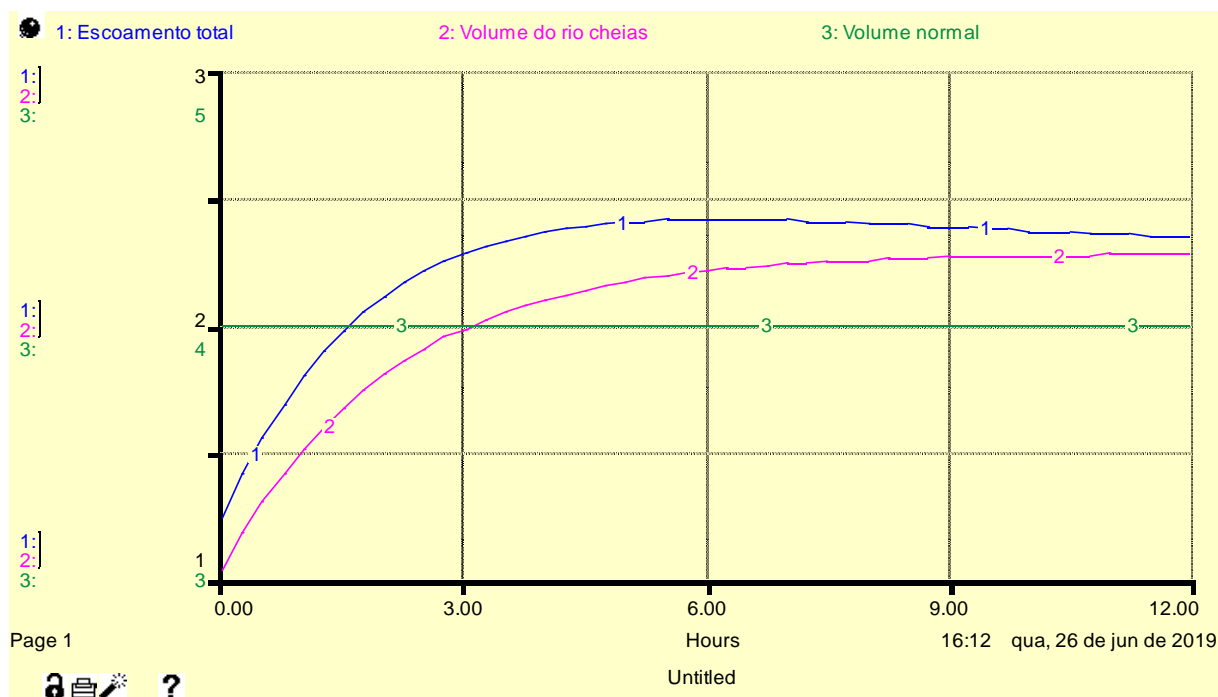
(isto é, a água que irá até a via pública) e o escoamento total (vazão do rio causada pelas chuvas no rio mais o escoamento das vias, retirando as drenagens).

Gráfico 1 - Simulação Estoques Figura 2



Observando as curvas, percebe-se que a curva do estoque de escoamento diminuiu com o passar das horas até aproximar-se do zero, isto se dá devido às saídas do estoque serem de acordo com a taxa de drenagem. Já a curva do escoamento total mede a vazão das cheias no rio, deste modo o escoamento (volume de água) cresce de forma exponencial até aproximadamente a hora 5, na qual o volume basicamente se mantém igual com poucas alterações. Por quesito de análise, o Gráfico 2 apresenta a comparação das cheias do rio com o volume normal para demonstrar o exato ponto em que são emitidos alertas para possibilidade de enchentes e alagamentos no município.

Gráfico 2 - Simulação Estoque (Figura 2)



Deste modo, percebe-se que um volume do rio normal foi considerado constante com cota de 4m, percebe-se, ainda, que mantendo a chuva de $0.17 \text{ mm}^3/\text{h}$, o escoamento total, vias públicas e do rio, depois de 1.50h equipara o volume do rio na sua cota normalmente mais baixo. Analisando apenas o rio, o volume do rio equipara no horário 3.25h. Assim, o volume do rio chega para a primeira curva em uma cota de 5,97 e para a segunda curva uma cota de 5,98, ou seja, ambas apresentam o mesmo resultado. Porém, se a primeira curva for colocada no tempo 3.25h igual, a segunda curva terá o total de 6,31 que se encontra dentro do intervalo de alerta da Defesa Civil.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo simular cenários das enchentes e alagamentos na cidade de Blumenau. Para atingir essa meta, apresentou-se um modelo de causa e efeito com intuito de demonstrar os ciclos de *feedbacks* existentes na área e possibilitar a identificação de pontos de estudos. Deste modo, a pesquisa focou na área referente ao aumento da cota do rio Itajaí que corta o município de Blumenau e é o causador dos desastres da região.

Focou-se ainda na área de planejamento do pré-desastre e, por meio da Dinâmica de Sistema, explicou-se o funcionamento do sistema atual e em que ponto deverão se concentrar

as políticas públicas e investimentos. Deste modo, analisando os dados, percebeu-se que as vias públicas influenciam diretamente no volume da cota do rio e a sua importância para contenção de alagamentos e enchentes.

A presente pesquisa aborda temas relevantes para o cenário da região, já que este é muito afetado pelos desastres hídricos como mencionado ao longo da pesquisa. Os resultados tornaram-se relevantes por apresentarem a visão sistêmica e o diagrama efeito-causa da bacia hidrográfica de Blumenau. Assim, percebeu-se a necessidade de continuidade de investimento principalmente na drenagem urbana como forma de reduzir os impactos causados pela vazão do rio e das oscilações no ciclo pluvial da região.

As limitações da presente pesquisa foram o estudo inicial da busca de compreensão do funcionamento sistemático da bacia analisada, desse modo desconsiderou a troca das políticas públicas aplicadas na região. Além disso, indica-se como trabalho futuro a ampliação dos estudos realizados na área focando nas demais fases dos desastres, além de buscar apresentação de políticas públicas para buscar a diminuição da drenagem pública e aumento da cota da rio. Por fim, aconselha-se a pesquisa e comparação entre municípios diferentes da mesma bacia hidrográfica, e criar um relatório de medidas a serem tomadas para redução dos riscos do desastre natural em questão.

REFERÊNCIAS

AHMAD, S; SIMONOVIC, S. P. An intelligent decision support system for management of floods. **Water Resources Management**, v. 20, n. 3, p. 391-410, 2006.

AHMAD, S; SIMONOVIC, S. P. Spatial system dynamics: new approach for simulation of water resources systems. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 18, n. 4, p. 331-340, 2004.

ANAYA-ARENAS, A. M.; RENAUD, J.; RUIZ, A. Relief distribution networks: a systematic review. **Annals of Operations Research**, [s. l.], v. 223, n. 1, p. 53–79, 2014.

BESIOU, M; PEDRAZA MARTINEZ, A. J.; VAN WASSENHOVE, L. N. **Vehicle supply chains in humanitarian operations**: Decentralization, operational mix, and earmarked funding. *Production and Operations Management*, v. 23, n. 11, p. 1950-1965, 2014.

BESIOU, M; STAPLETON, O; VAN WASSENHOVE, L. N. System dynamics for humanitarian operations. **Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management**, v. 1, n. 1, p. 78-103, 2011.

BESIOU, M; STAPLETON, O; VAN WASSENHOVE, L. System dynamics for humanitarian operations. **Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management**, v. 1.1, p. 78-103, 2011.

BLUMENAU (Município). Constituição (2010). Lei Complementar nº 751, de 23 de março de 2010. **Dispõe sobre o Código de Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo no Município de Blumenau e dá Outras Providências.** Blumenau, SC, Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/plano-de-zoneamento-uso-e-ocupacao-do-solo-blumenau-sc-2017-09-29-versao-compilada>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

BLUMENAU. ALERTABLU. ENCHENTES 2019. Disponível em: <<http://alertablu.cob.sc.gov.br/p/enchentes>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

BLUMENAU. CEOPS. **Picos de Enchentes.** 2019. Disponível em: <<http://ceops.furb.br/index.php/sistema-de-alerta/picos-de-enchentes>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

BLUMENAU. FAEMA. **Diagnóstico Socioambiental Do Município De Blumenau.** 2017. Disponível em: <https://www.blumenau.sc.gov.br/downloads/faema/diagnostico_socioambiental/caderno_3.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2019.

BLUMENAU. FUNDAÇÃO AGÊNCIA DE ÁGUA DO VALE DO ITAJAÍ. **Plano De Recursos Hídricos Da Bacia Do Itajaí.** 2010.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Ministério da Saúde faz mapeamento de desastres hidrológicos no Brasil.** Disponível em: <<http://www.saude.gov.br/noticias/svs/42867-ministerio-da-saude-faz-mapeamento-de-desastres-hidrologicos-no-brasil>>. Acesso em: 17 jun. 2019.

CASA CIVIL. **Brasil está mais preparado para desastres naturais.** 2014. Disponível em: <<http://www.casacivil.gov.br/central-de-conteudos/noticias/2013/11/brasil-esta-mais-preparado-para-os-desastres-naturais>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

CASTRO, A. L. C. **Manual de desastres: desastres naturais.** Brasília (DF): Ministério da Integração Nacional, 2003. 182 p.

CEPED. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 A 2012.** 2013. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

CERTI. **Plano Estadual De Recursos Hídricos De Santa Catarina - PERH/SC.** 2017. Disponível em: <http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Plano%20Estadual/etapa_b/PERH_SC_Cenario_atual_CERTI-CEV_2017_final-2.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2019.

DA UNIÃO, Controladoria-Geral. **Portal da transparência. Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN),** 2019.

DE PAULA, S. M; NODARI, E. S; ESPÍNDOLA, Marcos Aurélio. O crescimento urbano e as enchentes em Blumenau (SC). **Arquivo Geral da Cidade do Rio de Janeiro**, p. 201, 2014.

DIAZ, R; KUMAR, S; BEHR, J. **Housing recovery in the aftermath of a catastrophe: Material resources Perspective.** Computers & Industrial Engineering, v. 81, p. 130-139, 2015.

DIEDRICHS, D. R.; PHELPS, K; ISIHARA, P. A. Quantifying communication effects in disaster response logistics: A multiple network system dynamics model. **Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management**, v. 6, n. 1, p. 24-45, 2016.

DIEDRICHS, D. R.; PHELPS, K; ISIHARA, P. A. Quantifying communication effects in disaster response logistics: A multiple network system dynamics model. **Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management**, v. 6, n. 1, p. 24-45, 2016.

DURAN, S; GUTIERREZ, M. A.; KESKINOCAK, P. **Pre-positioning of emergency items for CARE international**. **Interfaces**, v. 3, p. 223-237, 2011.

ESTARQUE, M. **Política de prevenção de desastres naturais definha no país**. 2018. Disponível em: <<http://temas.folha.uol.com.br/natureza-do-desastre/introducao/politica-de-prevencao-de-desastres-naturais-definha-no-pais.shtml>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

ESTIAGEM NO OESTE CATARINENSE: diagnóstico e resiliência (Relatório Técnico-científico / Mário Jorge Cardoso Coelho Freitas; Francisco Henrique de Oliveira (Orgs.) – Florianópolis, 2017.

HEASLIP, G; SHARIF, A. M.; ALTHONAYAN, A. Employing a systems-based perspective to the identification of inter-relationships within humanitarian logistics. **International Journal of Production Economics**, v. 139, n. 2, p. 377-392, 2012.

IBGE.Blumenau–Santa Catarina, Brasil. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/blumenau>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

KABRA, G; RAMESH, A; ARSHINDER, K. Identification and prioritization of coordination barriers in humanitarian supply chain management. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 13, p. 128-138, 2015.

KOVACS, G; MOSHTARI, M. A roadmap for higher research quality in humanitarian operations: A methodological perspective. **European Journal of Operational Research**, 2018.

KUNZ, N; REINER, G; GOLD, S. Investing in disaster management capabilities versus pre-positioning inventory: A new approach to disaster preparedness. **International Journal of Production Economics**, v. 157, p. 261-272, 2014.

LI, L.; SIMONOVIC, S. P. System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American prairie watersheds. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 13, p. 2645-2666, 2002.

LIAO, Kuei-Hsien. A theory on urban resilience to floods—a basis for alternative planning practices. **Ecology and society**, v. 17, n. 4, 2012.

MESSER, N, **The role of local institutions and their interaction in disaster risk mitigation**: A literature review. Food and Agriculture Organization, United Nations, 2003.

ÖZPOLAT, K *et al.* Engaging donors in smart compassion: USAID CIDI's Greatest Good Donation Calculator. **Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management**, v. 5, n. 1, p. 95-112, 2015.

SCHETTINI, C. A. F. Hidrologia do Saco da Fazenda, Itajaí, SC. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 12, n. 1, p. 49-58, 2008.

SIEBERT, C. **Mudanças Climáticas e Desastres Naturais em Santa Catarina**: Impactos Socioterritoriais e Avaliação das Políticas Públicas. XVII Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional. São Paulo, p. 1-22, 2017.

WASIMI, S. A.; KITANIDIS, P. K. Real-time forecasting and daily operation of a multireservoir system during floods by linear quadratic Gaussian control. **Water Resources Research**, v. 19, n. 6, p. 1511-1522, 1983.

WINZ, I; BRIERLEY, G; TROWSDALE, S. The use of system dynamics simulation in water resources management. **Water resources management**, v. 23, n. 7, p. 1301-1323, 2009.

Como Referenciar este Artigo, conforme ABNT:

SOUZA, E. D; KERBER, J. C; MALDONADO, M. U; RODRIGUEZ, C. M. T; BOUZON, M. Aplicação da Dinâmica de Sistemas para Prevenção de Desastres Hídricos: Um Estudo na Cidade de Blumenau. **Rev. FSA**, Teresina, v.17, n. 2, art. 7, p. 122-142, fev. 2020.

Contribuição dos Autores	E. D. Souza	J. C. Kerber	M. U. Maldonado	C. M. T. Rodriguez	M. Bouzon
1) concepção e planejamento.	X	X	X	X	X
2) análise e interpretação dos dados.	X	X	X	X	X
3) elaboração do rascunho ou na revisão crítica do conteúdo.	X	X	X	X	X
4) participação na aprovação da versão final do manuscrito.	X	X	X	X	X