

## 05

# APLICAÇÃO DE SENSORES E MODELO GEOMORFOLÓGICO PARA MONITORAÇÃO DE ÁREAS DE RISCOS DE ACIDENTES NATURAIS

Yuri Marinho Olivatti<sup>1</sup>

Kurt André Pereira Amann<sup>2</sup>

Rodrigo Filev Maia<sup>3</sup>

Centro Universitário FEI (FEI) – São Bernardo do Campo – SP – Brazil

**Resumo:** *Com o crescimento populacional em grandes polos urbanos a ocupação de áreas com risco de desastres naturais cresce constantemente, tornando o trabalho para evacuação, em momentos emergenciais, cada vez mais complexo. Atualmente, um dos dispositivos de comunicação mais difundidos são os celulares. Este trabalho propõe, utilizando modelos matemáticos, identificar a possibilidade de uma situação de risco ocorrer e acionar, por meio de um aplicativo móvel, após a decisão de um especialista responsável pelo monitoramento, a população que se encontra na área de risco e indicar uma área segura para evacuação. Espera-se, com o modelo utilizado, identificar potenciais ocorrências de desastres naturais e que estas informações possam ser suficientes para salvar a população local.*

**Palavras-Chave:** *Desastres Naturais. Sensores. Geoinformática.*

**Abstrac.:** *With the population growth in large urban centers, the occupation of areas at risk of natural disasters is constantly growing and thus making the work for evacuation in emergency times more and more complex. Currently, one of the most widespread mechanisms of communication are cellular mobile devices. This paper proposes using mathematical models to identify the possibility of a risk occur and alert, through a smartphone application, after the decision of a specialist in charge of monitoring, the population in the risk area and designate a safe place for evacuation. The expected result of this work is that the sensors at the risk area and the model utilized indicate potential natural disaster occurrences and that this information may be sufficient to save the local population.*

**Keywords:** *Natural Disasters. Sensors. Geoinformatics.*

1. yuri\_olivatti@hotmail.com

2. kpereira@fei.edu.br

3. rfilev@fei.edu.br

## 1 Introdução

Muitos casos de mortes e perdas materiais devido a catástrofes naturais são registrados anualmente no Brasil. Segundo Collins (2004), mais de 29 milhões de brasileiros residem em áreas suscetíveis a inundações e 100 pessoas (em média) são vitimadas anualmente no Brasil. Esses números são decorrentes do crescimento populacional não planejado, resultando em moradias em áreas impróprias. Outras catástrofes que afetam a maioria das regiões brasileiras são as de deslizamentos de encosta. O processo de erosão e os deslizamentos, juntos à ação humana, estão constantemente causando alterações dos terrenos e estão em contínuo aumento no Brasil, principalmente nas regiões urbanas, construções irregulares, e são responsáveis por grandes acidentes, causando perdas materiais e de vidas (BRITO, 2013).

Estima-se que entre os anos entre 1970 a 2012, os desastres naturais causaram cerca de 1,94 milhões de mortes e danos econômicos de 2,3 trilhões de dólares em todo o mundo, sendo que na América do Sul foram mais de 50 mil vidas perdidas. (OMM, 2014).

A Defesa Civil é um conjunto de órgãos e entidades, públicos e privados, de ordem municipal a nacional, que visam a redução de desastres, a diminuição da ocorrência dos mesmos e seus efeitos. O trabalho do Sistema Nacional de Defesa Civil (SNDC) é garantir a prevenção de desastres naturais ou provocados pelo homem, com programas e planos para proteger a população e minimizar danos no caso de ocorrências, alertando, dando assistência às pessoas e recuperando as áreas deterioradas. Um importante trabalho é o de monitoração: onde ocorre coleta de dados relevantes para que associados a modelos se possa estimar a ocorrência de um desastre natural a partir das condições de uma determinada região, e com isso ser possível evacuar a população de forma organizada e evitar danos físicos e mortes. Esse monitoramento normalmente acontece com especialistas observando as condições das áreas de risco e prevendo de forma subjetiva a probabilidade de um evento ocorrer dado uma situação, por exemplo, durante uma forte chuva. Porém, o monitoramento também pode ocorrer de forma determinística, através de modelos matemáticos e uma série de parâmetros obtidos da região (NELSON, 2001).

Diante dessa situação, onde o monitoramento das regiões de risco e a evacuação através de sirenes se mos-

traram muitas vezes ineficazes, este projeto tem como proposta a obtenção de dados através de sensores e sua utilização em modelos geomorfológicos a fim de perceber e alertar a população de possíveis desastres naturais. O alerta à população é feita através de uma aplicação instalada em um dispositivo móvel, o qual possui diversas interfaces de rede para receber os alertas enviados pelo sistema de monitoração.

A obtenção dos dados para monitoração das áreas é possível através de sensores específicos. Instalados apropriadamente, poderão coletar dados referente ao solo, clima, nível de água, entre outros parâmetros, para monitoração em tempo real e aplicação dos modelos matemáticos. Os sensores podem comparar seus dados para detectar movimentações no solo e quais áreas sofreram maior variação, como funcionam alguns sistemas de predição de deslizamentos (TERZIS, et al. 2006), ou enviar dados a uma central, que os usará como parâmetros de entrada para algum modelo matemático de previsão de deslizamentos, como o SHALSTAB (RAMOS, et al. 2002), utilizado neste trabalho. O índice de criticidade de ocorrência do desastre e os dados medidos da região possibilitarão ao especialista do órgão responsável pelo monitoramento observar as alterações e identificar se será necessário emitir um alerta à população.

A análise em tempo real ficará a cargo de organizações responsáveis pela prevenção, proteção e assistência à população quanto a desastres naturais, como a Defesa Civil, que poderá alertar a população após a interpretação dos dados fornecidos pelos sensores e modelos.

Este trabalho é uma versão estendida da publicação realizada no 36º Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, no 43º SEMISH - Seminário Integrado de Software e Hardware, por Olivatti, Pereira e Maia (2016).

## 2 Objetivo

O objetivo geral deste projeto é monitorar áreas de risco através de sensores e indicar o potencial risco de deslizamentos de terra e inundação, utilizando modelos geomorfológicos de avaliação em tempo real do estado do solo e índices pluviométricos, permitindo a detecção de situações de risco e, após a análise de um especialista, gerar alertas de evacuação de pessoas localizadas em áreas consideradas de risco em risco.

Pretende-se oferecer a análise em tempo real do risco em que as regiões monitoradas se encontram para as organizações responsáveis, fornecendo medições de umidade do solo e os respectivos índices de estabilidade, com a utilização do modelo SHALSTAB de forma dinâmica. Também se espera como um potencial resultado a melhoria do processo de evacuação, através de um aplicativo para dispositivos móveis para a população, que indicará os locais seguros para fuga tendo como base a indicação dos centros de gerenciamento de emergências. Não se pretende substituir o ser humano na tomada de decisões, mas oferecer mecanismos que provenham subsídios para uma efetiva tomada de decisão.

## 2.1 Extensão do Trabalho

Nessa versão estendida do trabalho, procurou-se melhor descrever o modelo geomorfológico SHALSTAB utilizado, pois é um tema bastante relevante onde processamento realizado pelo sistema proposto tem como ponto fundamental esse modelo; é necessário também melhor esclarecimento das condições em que o modelo pode ser aplicado.

Também se destacou uma das contribuições do trabalho, a adaptação do modelo para que seja utilizado de forma dinâmica. As aplicações geralmente feitas coletam apenas uma amostra, aplicam o modelo e obtém-se um mapa da região analisada, gerando os índices de estabilidade do terreno. Com esse trabalho apresentou-se uma forma de medição que permite a atualização constante dos índices de estabilidade, pois como descrito, o índice de estabilidade do modelo é suscetível a mudanças da umidade do solo, o que muda constantemente a depender do clima da região analisada e da movimentação de fluidos no terreno.

Esta versão também apresenta detalhes a respeito da arquitetura utilizada para a obtenção dos dados dos sensores pelo servidor e o que motivou a sua escolha, que consiste em uma arquitetura centralizada, porém com processamento local em cada módulo (OLIVATTI; PEREIRA; MAIA, 2016).

## 3 Modelos Geomorfológicos

Um modelo matemático geomorfológico é um modelo com aplicações na análise de terrenos ou relevos com diversos objetivos, entre eles a análise de possíveis

deslizamentos em um determinado espaço geográfico. Modelos geomorfológicos determinísticos, em particular, apresentam algumas limitações com relação ao universo de conhecimento dos especialistas. Um modelo determinístico não necessariamente deve ser completo (não apresentando obrigatoriamente todos os parâmetros necessários para a solução ótima), onde a precisão do modelo está relacionada com as variáveis que são utilizadas.

O SHALSTAB, utilizado nesse artigo, é um modelo matemático geomorfológico determinístico, bastante difundido por parte dos estudos geomorfológicos e com precisão razoável (RAMOS et al., 2002; FERNANDES et al., 2004), que tem como objetivo apresentar locais em um espaço geográfico onde podem ocorrer os deslizamentos rasos, sendo possível prever um valor para a chuva crítica deflagradora da ruptura do solo (RAMOS, et al. 2002). De acordo com os resultados obtidos por Pradhan et al. (2014) para uma região em específico, a taxa de correta predição do modelo foi de 88,21%.

O tipo de deslizamento tratado pelo modelo é o translacional raso, onde de acordo com Dourado (2012, p. 57), “[...] o pacote de material que desliza, em movimentos rápidos e de curta duração, é limitado por uma descontinuidade plana”, característica de regiões onde há o contato entre dois tipos de solo diferentes ou entre solo e rocha.

$$Q_c = \frac{T \sin \theta}{(a/b)} \left[ \frac{C'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right]$$

Figura 1 - Modelo Matemático SHALSTAB

O modelo SHALSTAB, retratado na Figura 1, utiliza como parâmetros o índice de chuva crítica para ruptura do solo ( $Q_c$ ), a transmissividade do solo ( $T$ ), a densidade da água ( $\rho_w$ ), a densidade do solo úmido ( $\rho_s$ ), a área de contribuição por comprimento de contorno ( $a/b$ ), o ângulo de inclinação da encosta ( $\theta$ ) e o ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ). O  $\log(Q_c/T)$  representa o índice de estabilidade do solo, que quando maior que -2,2 indica uma região estável, e quando menor representa uma situação com diferentes graus de instabilidade (RAMOS, et al. 2002).

O modelo shalstab escolhido é normalmente utilizado com um Modelo Digital de Terreno (MDT), uma representação de um terreno em relação à sua altitude e

variações do relevo, em toda sua extensão. O mapeamento consiste na subdivisão de toda a área em células quadradas e na medição da altura de cada uma delas. A partir dessas informações o modelo é aplicado para cada célula do modelo do terreno, obtendo-se os índices de estabilidade e o mapa de suscetibilidade, com a indicação do risco de deslizamento em cada ponto da região. O modelo, porém, não é aplicado de forma dinâmica, os parâmetros necessários devem ser medidos do solo e os cálculos aplicados a partir dos mesmos. Para atualização do mapa de suscetibilidade, é necessária uma nova medição em campo.

Este trabalho propõe a adaptação e utilização do SHALSTAB de forma dinâmica, onde além de parâmetros fixos previamente calculados, o modelo será alimentado com outros parâmetros dinâmicos, obtidos em tempo real por meio de sensores instalados no local, possibilitando o monitoramento de regiões de risco. O parâmetro que mais varia e pode ser determinante para a definição do risco de deslizamento é a umidade do solo, onde as chuvas são muitas vezes as responsáveis pela ocorrência do desastre.

O modelo foi adaptado para a utilização da umidade do solo como parâmetro variável. Da definição de O'Loughlin (1986), a umidade é dada pela razão entre a quantidade de água que entra no sistema ( $Q_e$ ) pela quantidade de água que sai pelo sistema ( $Q_s$ ):

$$W = \frac{Q_e}{Q_s} = \frac{K \cdot \text{sen}\theta \cdot \cos\theta \cdot h \cdot b}{K \cdot \text{sen}\theta \cdot \cos\theta \cdot z \cdot b} = \frac{h}{z}$$

Figura 2 - Equação da Umidade Relativa do Solo

Sendo a última parcela da equação representada pelo quanto úmido se encontra o solo, uma razão entre a altura de água e espessura do solo. Com base no modelo da estabilidade de encostas, baseada na teoria dos taludes infinitos (MICHEL, 2013), temos a representação da porção saturada dada por:

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg}\theta}{\text{tg}\varphi}\right) + \frac{C}{\cos^2\theta \cdot \text{tg}\varphi \cdot \rho \cdot g \cdot z}$$

Figura 3 - Representação da Porção Saturada do Solo

Do modelo SHALSTAB demonstrado na Figura 1, é possível representá-lo, com base na teoria dos taludes infinitos, através da seguinte equação:

$$\frac{Q_c}{T} = \frac{b}{a} \cdot \text{sen}\theta \cdot w$$

Figura 4 - Representação do SHALSTAB em função da umidade

A utilização tradicional do SHALSTAB com o modelo digital de terreno para gerar o mapa de suscetibilidade normalmente ocorre de tempos em tempos, com todos os parâmetros do solo previamente medidos. Para gerar o mapa de suscetibilidade dinamicamente, atualizando-o constantemente com novos índices de estabilidade, é necessário um dispositivo em cada célula do mapeamento obtendo estes dados, onde regiões de grandes extensões pode ser um número elevado.

O modelo adaptado não será utilizado com o modelo digital de terreno; o sistema proposto não tem como objetivo gerar mapas de suscetibilidade em tempo real, apenas permitir através de uma interface de monitoramento a análise dos índices de estabilidade, de uma região de risco, com sensores posicionados a critério da entidade responsável ou de um especialista.

## 4 Módulo de Sensores

O módulo de sensores é composto pelos sensores adequados para medição dos parâmetros requeridos pelo modelo matemático utilizado, bem como de microcontroladores para processamento dos dados e envio das medições para o servidor web.

Para realizar essa medição, foram utilizados alguns sensores próprios como o sensor ultrassônico, capaz de medir o nível da água, o acelerômetro, que percebe vibrações e movimentações do solo e o de umidade do solo (*soil moisture sensor*). Apenas os sensores ultrassônico e de umidade foram utilizados com algum modelo, o acelerômetro apenas fornece informações adicionais para o monitoramento e pode ser utilizado com algum outro modelo, conforme prevê a arquitetura; embora a maioria dos deslizamentos ocorra devido às chuvas e variação na umidade do solo, alguns podem decorrer de tremores no solo, que podem ser monitorados através do acelerômetro, como proposto por Wasowski et al. (2012). Estes sensores estão ligados a um dispositivo integrado de microcontroladores, com um dispositivo Arduino e um Raspberry Pi, juntos em um único módulo, em uma arquitetura onde o Arduino faz a leitura e controle dos sensores e dispositivos conectados a ele, retornando quaisquer valores medidos ao Raspberry Pi, que com conexão à Internet pode enviá-lo a algum servidor ou outro dispositivo. Com essa proposta, o Arduino nas portas digitais tem conectado o sensor ultrassônico, e nas portas analógicas o acelerômetro e o sensor de umidade, fazendo a constante

medição, conversão de grandezas e envio dos dados ao Raspberry Pi, e este tem a função de consolidar as informações a aplicar no modelo matemático SHALSTAB, o qual realiza o estudo dos dados (medidos pelos sensores) e determina a probabilidade de ocorrer um desastre natural na região de onde as medições se originaram. O Raspberry Pi também administra a conexão com a Internet que é feita por um modem de conexão 3G/4G. Desta forma, todas as informações

medidas pelos sensores são enviadas para um servidor remoto e armazenadas em uma base de dados.

É importante ressaltar que esta arquitetura permite paralelismo entre a leitura dos dados do sensor (Arduino) e a execução dos cálculos e envio ao servidor web (Raspberry Pi), evitando assim que dados medidos pelos sensores sejam perdidos enquanto o dispositivo está ocupado com operações de cálculo ou envio à Internet.

## 5 Arquitetura

A arquitetura se baseia em 3 módulos principais: Os sensores, o servidor do sistema de emergências e o aplicativo para dispositivos móveis. O sistema possui serviços de comunicação, organização e gestão de sensores, que permite gerenciar todos os sensores instalados, incluir ou remover novos sensores e receber as medições dos mesmos.

Na camada da aplicação do modelo há o serviço de cálculo de probabilidade, que indica os índices de criticidade para cada tipo de risco monitorado (no caso inundação e deslizamento) na região ao responsável

pelo monitoramento, e o serviço de determinação de área de risco, onde o especialista poderá determinar a área de risco conforme seu julgamento.

Na camada de comunicação com o aplicativo, o serviço de formatação de dados prepara as informações a serem enviadas para o usuário, o serviço de cálculo de posicionamento define em que região o usuário está e o serviço de alerta define se o mesmo se encontra em uma região de risco, enviando a ele rotas de evacuação cadastradas.

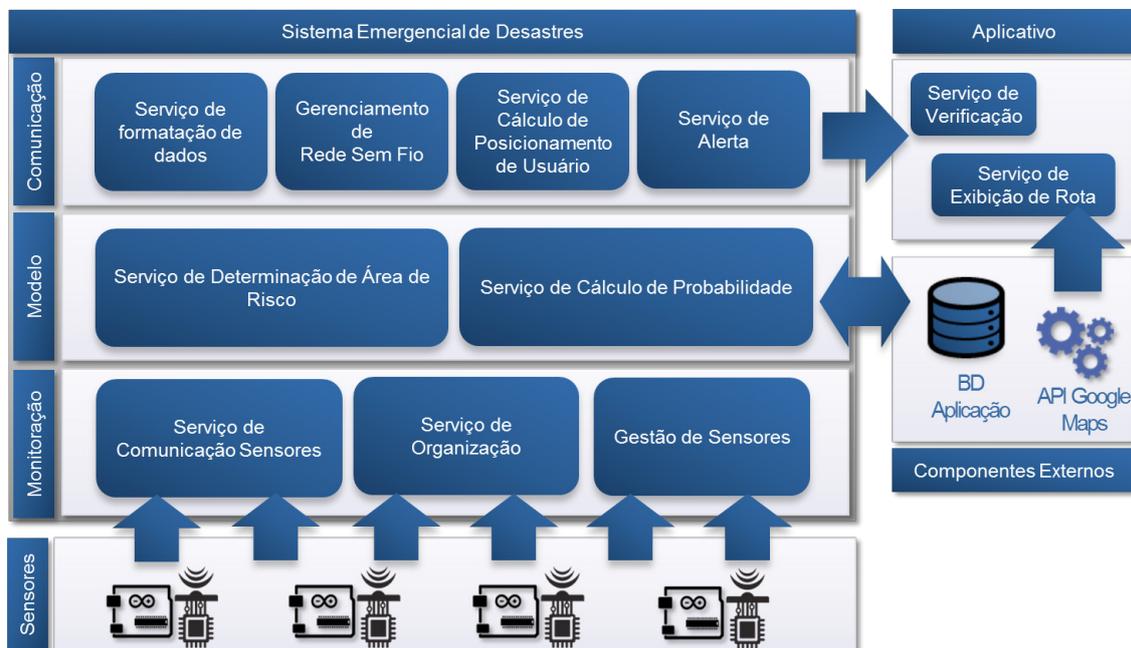


Figura 5 - Arquitetura do Sistema

No ponto de vista dos dados, a rede de sensores utilizada é uma rede de processamento local, onde cada módulo de sensor possui capacidade de processamento e realiza os cálculos localmente, para após isso enviar os dados a um servidor. Por outro lado, em uma rede de

sensores centralizada, os sensores, nós, normalmente com capacidade reduzida enviariam as medições a um nó central, este responsável pelo processamento dos dados e envio a um servidor; em Internet das Coisas, também poderia considerar-se uma arquitetura M2M,

mente ao servidor. Também não há a necessidade do cruzamento de dados antes das informações chegaram ao sistema de monitoramento, assim o processamento local além de necessário, é suficiente.

Considerando o sistema como um todo, os módulos de sensores e smartphones conectados ao servidor, a arquitetura consiste em uma organização centralizada, onde os dados são enviados a um servidor para a análise e tomada de decisão, porém com um processamento local, distribuído nos módulos de sensores, que enviam os dados preparados para a tomada de decisão. Desta forma, algumas limitações de arquiteturas centralizadas são reduzidas, onde não é necessário processar os dados enviados e há menor sobrecarga do servidor

## 6 Implementação

A implementação proposta é composta de duas partes distintas: um módulo de sensores com processamento local e um sistema servidor construído para consolidação dos dados dos módulos de sensores, manipulação de mapas e gerenciamento de usuários e envio de alertas aos mesmos.

### Módulo de Sensores

Para o módulo de sensores foram utilizadas as funcionalidades dos microcontroladores Arduino e Raspberry Pi, junto com um conjunto de sensores.

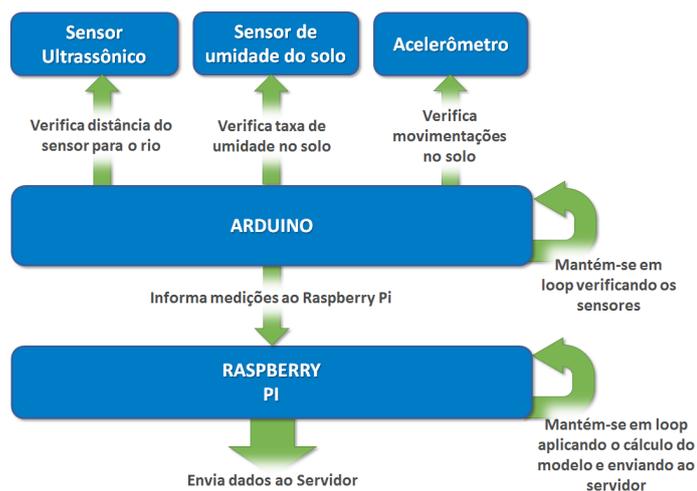


Figura 6 - Funcionamento do Módulo de Sensores

Os sensores escolhidos, de umidade do solo, ultrassônico e acelerômetro, funcionam com o Arduino e foram ligados a ele de acordo com a Figura 7, de forma a possibilitar a leitura dos dados medidos.

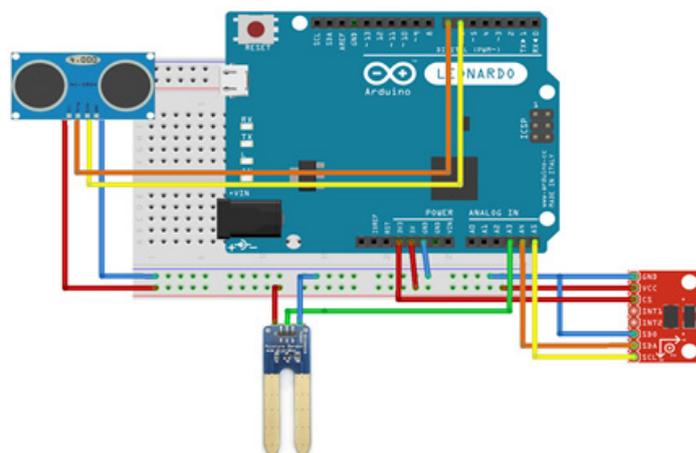


Figura 7 - Sensores Conectados ao Arduino

O Raspberry Pi está conectado ao Arduino através da porta serial e receberá do mesmo as medições realizadas a cada segundo, realizando os cálculos necessários e fornecendo ao servidor as informações obtidas a respeito dos riscos de inundação e deslizamento. O código em Python executando no dispositivo que controla os sensores possui alguns parâmetros constantes e necessários para realização dos cálculos, a respeito da região monitorada, como latitude, longitude, altura do rio ou ângulo de inclinação da encosta, que devem ser definidos para cada região na instalação do módulo. Com a realização dos cálculos, os dados são enviados ao servidor remoto, através de uma requisição HTTP.

### Servidor Web e Interface de Monitoramento

O servidor é composto pela interface do operador do centro de monitoramento de emergências, dois web-services de comunicação, um para o aplicativo e outro para o módulo de sensores, e o banco de dados, como ilustrado na Figura 8.

Os *webservices* de comunicação são responsáveis por salvar as medições dos módulos de sensores enviadas, e fornecer aos aplicativos nos dispositivos móveis as informações a respeito da posição em que estão localizados, incluindo locais de fuga caso a região esteja em perigo; implementados em *PHP*, recebem requisições *HTTP* dos módulos de sensores, salvando as medições em banco *SQL Server*, e dos aplicativos, fornecendo ao mesmo a partir da base de dados as condições da região.

Com a interface de monitoramento, é possível que um especialista na central possa analisar a condição das regiões e alertar a população se percebido algum perigo, definindo locais seguros para evacuação. A inter-

face foi desenvolvida em *ASPX* e *HTML+Javascript*, possibilitando a exibição de uma página dinâmica, em constante atualização com as medições e condições das regiões monitoradas.

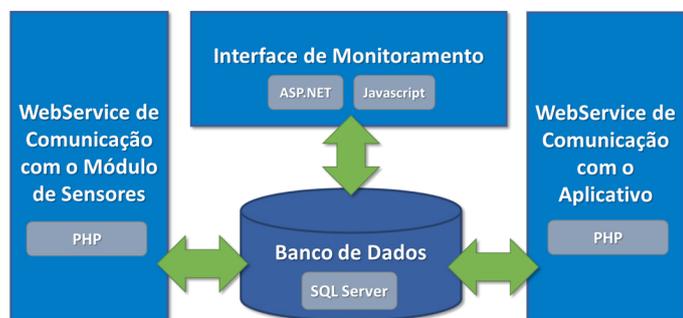


Figura 8 - Arquitetura básica do servidor de monitoramento

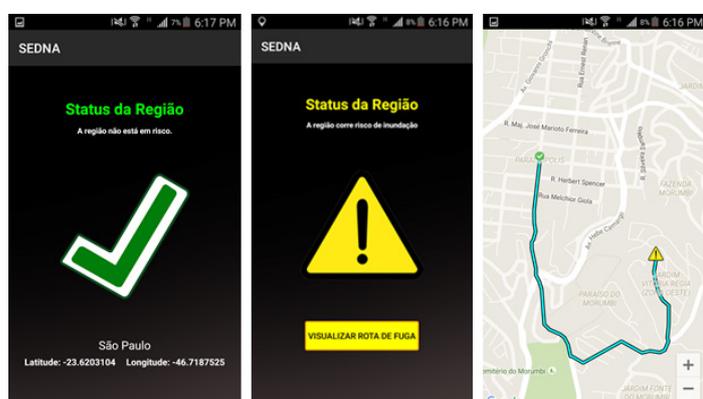


Figura 9 - Telas do Aplicativo

O aplicativo móvel destinado a smartphones (Figura 9) é o elemento do sistema que possibilitará a população em risco ser notificada. Desenvolvido para a plataforma Android, em Java, é utilizado o recurso de GPS dos smartphones para obter a posição do usuário e enviado constantemente requisições *HTTP* ao servidor solicitando as condições naquela localização; caso a região esteja em risco, também receberá indicações de locais seguros, onde através da API do Google Maps, integrada com o sistema Android, exibirá um mapa com a rota para evacuação. Também há um processo em background em execução, onde sempre que a região se encontrar em perigo o aplicativo abrirá e um som de alerta será disparado.

## 7 Resultados

Para a realização dos testes foi desenvolvido uma maquete representando uma situação real de região de risco, detalhada na seção 5.1. A solução do sistema emergencial teve resultados satisfatórios e seus dois

modos, para deslizamento e inundação. Dois resultados relevantes devem ser destacados. O primeiro diz respeito quanto à reação do sistema para diferentes valores enviados pelos sensores. Sempre que o nível pluviométrico ou o índice de estabilidade apresentarem valores considerados perigosos, o sistema reage adequadamente e a interface de monitoração mostra apropriadamente o risco na região em que o sensor está posicionado. O segundo diz respeito às medições dos sensores e resultado dos modelos calculados em relação ao risco real naquela região; os testes mostram que os resultados dos cálculos efetivamente indicam o risco antes do desastre ocorrer, sendo possível realizar a evacuação.

### Maquete para testes

Para realização dos testes e verificação da metodologia aplicada, foi desenvolvido uma maquete para simulação dos desastres de inundação e deslizamento de terra (Figura 10). A maquete representa uma área em torno de uma cidade paulista, onde há um rio em frente de um prédio que representa um risco de inundação, e mais a frente um morro com alta inclinação (45 graus), representando um perigo de deslizamento.

A maquete possui uma base onde ficarão todos os componentes eletrônicos (o módulo de sensores), e alguns orifícios por onde os fios dos sensores passam e são posicionados na montanha e próximo ao rio; nessa base também há um reservatório de água com bombas submersíveis, que através de mangueiras podem encher o rio, umedecer o solo do morro e irrigar a superfície em uma espécie de chuva, através de furos na mangueira, simulando uma infiltração, processo natural onde ocorre a entrada de água no solo através da interface solo-atmosfera, atravessando a superfície e causando a saturação do mesmo (PANACHUKI, 2003). Assim, é possível simular a situação dos dois desastres em uma escala menor, que é a maquete, e verificar o funcionamento do sistema desenvolvido.

Para os testes foram preparadas amostras de solo típicas de uma região da cidade estudada; o solo foi preparado a partir de uma mistura de solo siltoso (entre areia e argila, possuindo partículas pequenas e corpo rígido), adequado para a simulação de deslizamento, menos rígido que o solo argiloso, mas mais coeso que o puramente siltoso. Dados como coesão e peso específico do solo foram medidos para configuração correta do módulo de sensor, com os parâmetros necessários

para realização dos cálculos do modelo. É importante ressaltar que a configuração exata do solo da região não foi mapeada para a maquete, limitando-se apenas à inclinação e ao tipo de solo (siltoso), representativos de um risco de deslizamento.



Figura 10 - Imagem da maquete, com a mistura de solo aplicada e sensores posicionados

### Testes de deslizamento

O primeiro teste foi realizado utilizando os parâmetros constantes da maquete, como a inclinação da encosta, porém simulando os dados medidos pelos dos sensores, como indicado na Figura 11.

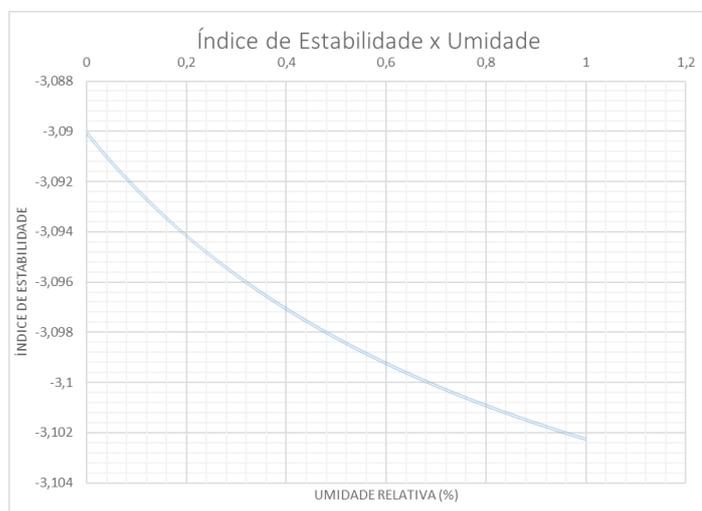


Figura 11 - Gráfico do Índice de Estabilidade x Umidade

Utilizando o modelo matemático SHALSTAB e parâmetros pré-estabelecidos, verificou-se a reação do sistema. Conforme a umidade variou de 0 a 1 (0% a 100%), o resultado calculado pelo modelo matemático também mudou, indicando maior risco conforme a umidade aumentava, e o sistema corretamente reagiu à variação, mudando a cor da região na interface e indicando que estava em perigo.

De acordo com o modelo SHALSTAB, os resultados do modelo de estabilidade indicam o seguinte grau de instabilidade para os intervalos calculados, com risco variando de 1 a 7:

- Índice de risco 1, região incondicionalmente estável
- Maior que -2,2: Índice de risco 2 – região medianamente estável
- Entre -2,2 e -2,5: Índice de risco 3 – região pouco estável
- Entre -2,5 e -2,8: Índice de risco 4 – região pouco instável
- Entre -2,8 e -3,1: Índice de risco 5 – região medianamente instável
- Menor que -3,1: Índice de risco 6 – região muito instável
- Índice de risco 7, região incondicionalmente instável

Em regiões com baixa declividade, mesmo com o solo totalmente saturado, o modelo SHALSTAB retornará o índice de risco 1, região incondicionalmente estável, enquanto para uma alta declividade o modelo retornará o índice 7, incondicionalmente instável, com o solo saturado ou não. Uma região é considerada de alta declividade caso seu ângulo de inclinação seja maior que o ângulo de atrito do solo, conforme a equação (1), e de baixa declividade caso cumpra com a equação (2) da Figura 12 (RAMOS et al., 2002; MICHEL, 2011).

$$\tan \theta \geq \tan \phi + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \quad (1) \quad \tan \theta \leq \tan \phi \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \quad (2)$$

Figura 12 - Relações para determinação do nível de declividade

Para os resultados obtidos no gráfico, com umidade de 0% a região apresenta índice de risco 5, onde aumenta gradualmente e ao se tornar 0,7, o índice passa a ser 6. É importante ressaltar que estamos considerando uma região de que já é de risco, devido sua alta inclinação, onde o modelo SHALSTAB indica a região inicialmente com o índice de risco 5. Cada região monitorada pode possuir parâmetros diferentes, onde a umidade influencia mais ou menos e a variação do índice de risco é diferente.

Posteriormente os testes de deslizamento foram realizados na maquete, com o solo adequado para tais expe-

rimentos, em uma superfície com ângulo de inclinação de 45°. No decorrer dos testes foram utilizados para causar o deslizamento os sistemas de infiltração de água através da simulação de chuva e o sistema de umidificação utilizando as mangueiras internas. Os testes mostraram que com os cálculos do modelo é possível perceber o alto risco de deslizamento algum tempo antes do desastre ocorrer, possibilitando a evacuação.

Em um dos testes, os sistemas de infiltração e chuvas foram ligados (instante  $x$ ), com um solo saturado apresentado a umidade inicial de 65%, próximo da umidade necessária para a ruptura do solo preparado. Decorridos dois minutos e cinquenta segundos ( $x+2:50\text{min}$ ), o nível de risco subiu para 6, o que já representa um alto risco de deslizamento conforme detalhado acima, e após mais um minuto e doze segundos ( $x+4:02\text{min}$ ) o deslizamento ocorreu. Antes de ocorrer, quando o índice subiu para 6, foi enviado através da interface de monitoramento um alerta aos usuários na região, exibido corretamente no aplicativo. No teste verificou-se o funcionamento da comunicação fim-a-fim, desde a medição dos sensores até o alerta ao usuário, bem como a validade do modelo SHALSTAB para os valores de umidade medidos, mostrando que a região se encontrava em risco 1 minuto e 12 segundos antes do desastre ocorrer, permitindo a evacuação. A Figura 12 mostra a variação das medições de umidade em função do tempo, do instante inicial de testes (0 seg) até o final (241 seg), e a Figura 13 mostra como o índice de risco, como definido acima, variou nesse mesmo período.

Vale ressaltar que o tempo do instante em que o risco subiu para 6 até o momento em que o deslizamento iniciou foi curto, propositalmente, pois o cenário montado já era classificado como uma área de risco, devido sua alta inclinação e a mistura de solo preparada, processo acelerado pela entrada de água por diversos pontos em todo o sistema, com alta vazão, que pode não representar uma situação real, de forma proposital a causar rapidamente a ocorrência do evento de deslizamento; assim, o tempo; o especialista pode analisar e julgar se a região está em risco ou não de acordo com os cálculos do modelo e a umidade que vai aumentando, e realizar o alerta aos usuários se necessário. Assim, não há um índice de risco em específico em que se pode afirmar com certeza que o desastre ocorrerá (embora a indicação do modelo), é uma decisão passível de julgamento humano.



Figura 13 - Gráfico da Umidade do Solo x Tempo

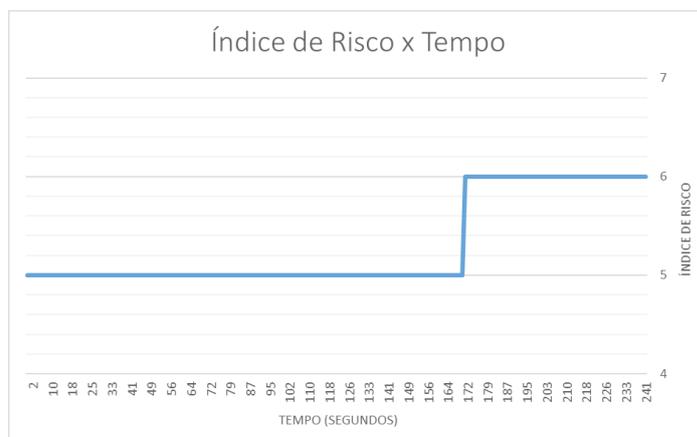


Figura 14 - Gráfico do Nível de Risco x Tempo

### Testes de Inundação

Os testes simulados mostraram que o sistema reage corretamente aos valores do índice do nível de água medido. O índice é calculado com base na profundidade do rio, e o nível de água presente, sendo um valor percentual do quanto o mesmo está cheio. A partir de testes empíricos, os seguintes intervalos foram definidos:

- Índice de 0 a 0,5: Região segura
- Índice de 0,5 a 0,75: Região em alerta
- Índice superior a 0,75: Região em risco

Definindo o intervalo dessa forma, é possível manter o responsável pelo monitoramento atento às regiões em alerta, passíveis de inundações, porém ainda não em risco, onde com nível superior a 75% a central de monitoramento o alertará, e de acordo com o seu julgamento o aviso de evacuação poderá ser emitido. É importante perceber que tais intervalos devem ser estabelecidos pela autoridade de monitoramento, analisando e definindo o risco em que a região se encontrará para diferentes índices. Para a maquete apresentada o sistema respondeu adequadamente, indicando o risco conforme o nível do rio subiu.



**Figura 15 - Gráfico do Nível do Rio x Tempo**

Testes realizados de inundação foram realizados na maquete, no local criado para tal experimento. A profundidade do rio é de 6,5cm e a altura do sensor ultrassônico é de 14,2cm. Assim, com o sensor medindo uma distância de 14,2cm, se conclui que o nível de água é 0, e o índice portanto é de 0%. A partir desse nível do rio, a bomba d'água foi ligada para a entrada de água; após o período de aproximadamente 1 minuto e 29 segundos, o sistema indicou a região como em alerta, com um índice em 50%, e em 1 minuto e 52 segundos a região entrou em risco de inundação, representando 75% do rio cheio, com um crescente aumento, sendo assim necessário ao operador emitir um alerta aos usuários; esse teste está representado no gráfico da Figura 14. O sistema reagiu corretamente ao aumento do nível, onde verificou-se a eficácia do sistema no monitoramento do desastre. O tempo adequado para evacuação deve ser definido pela autoridade responsável, onde os intervalos de risco para os níveis do rio devem ser ajustados de forma a indicar a situação perigosa com a antecedência desejada.

## 8 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos foram satisfatórios para um único módulo de sensores. O sistema reagiu corretamente indicando o nível do rio e o índice de estabilidade, e o perigo conforme as simulações afetavam o ambiente, oferecendo ao especialista os dados necessários a uma tomada de decisão. Da mesma forma, o mecanismo de alerta aos usuários pode ser utilizado para enviar alertas com antecedência à ocorrência do desastre.

Apesar de um teste simulado com um único módulo

de sensores, é possível constatar que o sistema funcionará da mesma forma com mais de um dispositivo instalado. Dado que um módulo em uma certa posição realizou as medições e enviou o risco para o servidor, outro módulo em outra posição na região de risco fará o mesmo, independentemente do valor das medidas. O risco identificado em cada dispositivo fica destacado na interface de monitoramento, cabendo ao especialista monitorando interpretar as possíveis diferenças e o que aquilo representa para esta região.

Especificamente para inundações, é necessário notar que sensores com processamento local pode não ser útil da forma apresentada nesse trabalho, já que não captam o volume de água em curso, rio acima. São necessários novos testes com mais módulos de sensores, e possivelmente o cruzamento dos dados medidos por todos eles no servidor, para melhor identificação do risco.

A decisão sobre evacuação de áreas de risco ainda é de responsabilidade humana, embora se possa instalar dispositivos de monitoramento em diversos pontos para fornecer dados à central de monitoramento. Em conjunto com os cálculos locais em cada módulo para identificação do risco naquele ponto, uma otimização possível seria utilizar técnicas para cruzamento de dados no servidor: com as medições pontuais e gerais a respeito da área monitorada, o especialista poderá ter mais informações relevantes para uma decisão mais rápida e acurada.

## 9 Considerações Finais

O trabalho teve como o objetivo utilizar o sensoramento em regiões passíveis de desastres naturais de deslizamentos rasos de terra e inundações para o monitoramento das condições em tempo real, e permitir através do sistema desenvolvido alertar a população daquela região através de um aplicativo móvel quando o especialista responsável julgar necessário. Com o modelo matemático SHALSTAB utilizado com as medições feitas pelo módulo de sensores, foi possível indicar na interface de monitoramento desenvolvida o índice de estabilidade em que a região monitorada se encontrava e as medições de cada sensor naquele momento, permitindo a análise do risco.

Com a maquete desenvolvida, foi possível validar o sistema como um todo, de ponta a ponta. Nos testes

realizados em laboratório se comprovou que o sistema possui uma arquitetura, dispositivos de monitoração e sensores adequados para monitorar o estado atual do solo e indicar possíveis riscos com antecedência à ocorrência do evento para a central de monitoramento, responsável por emitir o alerta e evacuar a região através do aplicativo para smartphones.

Os resultados observados através da implementação do sistema e testes com a maquete, é possível concluir que o sistema consegue atender as necessidades e os objetivos previamente estipulados com relação a efetividade de evacuação de regiões de risco.

Em termos de implementação e adoção do sistema em larga escala, é importante perceber que em relação ao monitoramento de inundações são necessárias poucas alterações no modelo utilizado para garantir o funcionamento em qualquer tipo de margem de rio, lago ou córrego. Para desastres como deslizamento de terra, o sistema computacional necessita de um mapeamento prévio do solo e a adaptação do modelo matemático para cada local de implantação, pois os parâmetros de configuração do modelo são dependentes das características do solo a ser monitorado. Portanto, o modelo não deve ser aplicado indiscriminadamente para qualquer região.

O sistema foi testado e estudado somente com um único módulo de sensores, através do desenvolvimento e uso de uma maquete que representa uma área de uma região metropolitana. Para o monitoramento da mesma região *in loco*, é importante que sejam utilizados diversos módulos para obtenção das condições em diferentes pontos da encosta e do rio para um processamento central no servidor e agregação dos dados, permitindo a análise da situação geral de toda a região, e não de somente alguns pontos.

O modelo SHALSTAB é normalmente utilizado para a geração de mapas de susceptibilidade, porém não em tempo real. O modelo adaptado neste trabalho admite tal utilização, porém pode ser necessário utilizar um número elevado de sensores, um para cada célula do mapa digital do terreno, conforme apresentado neste trabalho, além da modificação da interface de monitoramento, que passará a exibir também um mapa de susceptibilidade.

## Referências

BRITO, G. *Modelo de Monitoramento de Deslizamento de Encostas Por Meio de Sensor Multiparamétrico*. Dissertação (Pós-graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2013.

COLLINS, T. *Disaster Risk for Floods: 1980 – 2000*. Tokyo: United Nations University, 2004. 56 f. Disponível em: <<http://www.unu.edu/news/ehs/floods.doc>>. Acesso em: 29 mar. 2016.

DOURADO, F.; ROIG, H.L. Mapas de Susceptibilidade a Escorregamentos Rasos, usando os modelos shalstab e sinmap, da Bacia do Rio Paquequer. *Caderno de Estudos Geoambientas*, Teresópolis-RJ, v. 2, n. 1, p. 1, 2012.

FERNANDES, N. F., et al. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. *Catena* 55, p. 163-181. 2004. Disponível em: <[http://gis.ess.washington.edu/grg/publications/pdfs/Fernandes\\_et\\_al.pdf](http://gis.ess.washington.edu/grg/publications/pdfs/Fernandes_et_al.pdf)>. Acesso em: 22 set. 2016.

GOMIDE, R. Só 10% dos moradores atendem a sirenes de evacuação em áreas de risco do Rio. *Último Segundo, Rio de Janeiro, 17/01/2013*. <http://ultimosegundo.ig.com.br/brasil/rj/2013-01-17/so-10-dos-moradores-atendem-a-sirenes-de-evacuacao-em-areas-de-risco-do-rio.html>, 29 março 2016.

MICHEL, G. P. *Estudo de Escorregamentos na Bacia do Rio da Cunha, Rio dos Cedros/SC, com modelos SHALSTAB E SINMAP*. 2011. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/124560/284.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2016.

MICHEL, G. P. *Modelagem de Estabilidade de Encostas com consideração do efeito da vegetação*. 2013. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, 2013.

NELSON, F. F., GUIMARÃES, R. A., MONTGOMERY, D. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Rio de Janeiro, v. 2, 2001. Disponível em: <[http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/15860/1/ARTIGO\\_CondicionantesGeomorfologicosDeslizamentos.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/15860/1/ARTIGO_CondicionantesGeomorfologicosDeslizamentos.pdf)>. Acesso em: 29 mar. 2016.

NULLIS, C. Atlas de Mortalidades e Perdas Econômicas por fatores de Clima e Desastres Naturais. *Organização Meteorológica Mundial (OMM)*, Geneva, n. 998, p.11, julho 2014. Disponível em: <[https://www.wmo.int/pages/mediacentre/press\\_releases/pr\\_998\\_en.html](https://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_998_en.html)>. Acesso em: 29 mar. 2016.

OLIVATTI, Y. M.; PEREIRA, A. K. A.; MAIA, R. F. SEDNA – Sistema Emergencial para Desastres Naturais. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, 36., 2016, Porto Alegre, RS. *Anais...* Porto Alegre, RS: Edipucrs, 2016. p. 1748 - 1759. Disponível em: <<http://ebooks.pucrs.br/edipucrs/anais/csbc/assets/2016/semish/12.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2016.

PANACHUKI, E. *Infiltração de água no solo e erosão hídrica, sob Chuva simulada, em sistema de integração agricultura-pecuária*. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Programa de pós-graduação em Agronomia, MS: UFMT. 2003. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/daniel/Downloads/Material/Teses%20Orientadas/Tese%20Infiltracao%20de%20agua%20no%20solo.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2016.

RAMOS, V. M., et al. Aplicação do Modelo Shalstab, em ambiente Arcview, para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento raso na região do quadrilátero férreo (MG). *Espaço & Geografia*, v. 5, 2002. Disponível em: <[http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10656/1/ARTIGO\\_AplicacaoModeloShalstab.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10656/1/ARTIGO_AplicacaoModeloShalstab.pdf)>. Acesso em: 29 mar. 2016.

TERZIS, A. *Slip Surface Localization in Wireless Sensor Networks for Landslide Prediction*. 2006. Disponível em: <<http://www.cs.jhu.edu/~terzis/landslide-camera.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2016.

WASOWSKI, J., et al. Local scale seismic landslide susceptibility assessment based on historic earthquake records combined with accelerometer monitoring and ambient noise data. In: Earthquake-Induced Landslides, International Symposium on Earthquake-Induced Landslides, 2012, Kiryu (Japão). *Proceedings...* Kiryu (Japão), 2012.

