

INTEGRAÇÃO DE MAPEAMENTO DE RISCO E ÍNDICES PLUVIOMÉTRICOS NO MONITORAMENTO E ALERTA DE RISCO DE ESCORREGAMENTOS PLANARES NO LITORAL NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

COMBINATION OF RISK MAPPING AND RAIN INDEX FOR PLANAR LANDSLIDES
RISK MONITORING AND WARNING IN NORTH COAST OF STATE OF SAO PAULO

CLÁUDIO JOSÉ FERREIRA

Instituto Geológico, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: cferreira@sp.gov.br

DENISE ROSSINI-PENTEADO

Instituto Geológico, São Paulo, SP, Brasil, drossinisp@gmail.com

CELIA REGINA DE GOUVEIA SOUZA

Instituto Geológico, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: celiagouveia@gmail.com

GLAUCIO ALMEIDA ROCHA

Consultor em Geotecnologia, Salvador, BA, Brasil. E-mail: glaucio.rocha@gmail.com

LORENA DE SOUZA

ThoughtWorks Brazil, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: lcsouza@thoughtworks.com

ANTONIO CARLOS MORETTI GUEDES

Instituto Geológico, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: acmguedes@sp.gov.br

RESUMO ABSTRACT

Modelos de gerenciamento de risco, geralmente, destacam as etapas de análise e monitoramento para uma eficiente redução e mitigação de desastres. Este trabalho desenvolveu modelo de monitoramento de risco de escorregamentos planares em áreas residenciais-comerciais-serviço, em tempo quase real, para emissão de alertas de desastres, combinando dados de mapeamento de risco com índices pluviométricos de chuva acumulada e prevista. A área de estudo abrangeu os municípios de Ubatuba, Caraguatatuba, São Sebastião e Ilhabela, do Litoral Norte do Estado de São Paulo. A organização, tratamento e análise dos dados foi feita na plataforma TerraMA² desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. A análise de risco fundamentou-se na definição de unidades espaciais de análise, denominadas de Unidades Territoriais Básicas - UTB resultantes da intersecção de planos de

Risk management models usually point out the importance of risk analysis and monitoring for an effective disaster reduction and mitigation. This work developed a model of monitoring landslide risk over housing-commercial-service areas, in near real-time, applied to disasters warning communication, combining landslide risk data and both pluviometric index of past and future rain. The studied area comprised the municipalities of Ubatuba, Caraguatatuba, São Sebastião and Ilhabela, on the North Coast of the State of São Paulo. The organization, treatment and analysis of data was made on the TerraMA² computational platform developed by the National Spatial Research Institute - INPE. The risk analysis was based on the landscape characterization expressed by Basic Territorial Units - UTB, resulting of intersection of layers of the basement and the land

unidades do embasamento geológico-geomorfológico e do uso e ocupação da terra. Os dados dinâmicos de chuva acumulada foram obtidos a partir do satélite GOES ou radar meteorológico e a chuva prevista pelo modelo ETA 5km. A forma matricial proposta correlaciona quatro classes de risco que representam situações cada vez mais críticas quanto à ocorrência de danos com nove intervalos do índice pluviométrico de 24 horas. O índice pluviométrico utilizado sintetiza dois aspectos fundamentais na deflagração de processos perigosos e de seu gerenciamento: a chuva acumulada ou antecedente em 22 horas e a chuva futura ou prevista nas próximas 2 horas. Cada célula da matriz é enquadrada em um dos quatro níveis de alerta, denominados observação, atenção, alerta e alerta máximo, que indicam um aumento da complexidade do gerenciamento das situações de risco, desde o nível de observação até o nível de alerta máximo. O modelo proposto tem como premissa a utilização das áreas de risco como fator fundamental para a definição dos níveis de alerta, apresentando o mesmo nível de influência que os índices pluviométricos.

Palavras-chave: TerraMA², chuva, plano de contingência, desastre.

1 INTRODUÇÃO

Diversos modelos de gerenciamento de risco sejam eles específicos para eventos geodinâmicos (ONU 2004), ou genéricos (ISO 2009), destacam a importância das etapas de análise e monitoramento para uma eficiente avaliação dos impactos, redução de risco e implantação de sistemas de alerta.

Risco pode ser definido como a combinação da probabilidade de ocorrência de um evento e suas consequências negativas. Em geral, a análise de risco é realizada a partir da caracterização de três variáveis: perigo, vulnerabilidade e dano potencial (Tominaga *et al.* 2004, Ferreira & Rossini-Penteado 2011) ou exposição (Varnes 1984, Remondo *et al.* 2008).

A abordagem sintética ou de paisagem representa uma concepção metodológica aplicada em mapeamentos de risco baseada na delimitação prévia de unidades de análise que, de forma integrada, guardam correspondência com elementos ou representações identificáveis em determinada porção do território, ora enfocando suas dimensões naturais geológicas-geotécnicas (Vedovello 2000, Fernandes da Silva *et al.* 2010, Fernandes da Silva & Cripps 2011), ora enfatizando as relações

cover units. The dynamic data of rainfall were obtained from GOES satellite or radar and the forecast rain from ETA 5km model. The matrix form proposed model correlates, in columns, four risk classes indicative of increasing losses, and in the lines, nine intervals of the pluviometric index. The proposed pluviometric index meet two aspects that matters for triggering hazardous processes and their management: the past rainfall in the last 22 hours and the future rainfall in the next 2 hours. The intersection cells indicate one among the four warning levels, named observation, attention, alert and maximum alert, that indicates increasing complexity for risk management from observation to maximum alert levels. Such model stress the role of risk mapping besides pluviometric index to define warning levels.

Keywords: TerraMA², rain, contingency plan, disaster.

destas com processos antrópicos (Cendrero *et al.* 1992, Ferreira & Rossini-Penteado 2011, Ferreira *et al.* 2013).

Cendrero *et al.* (2004) propõe o uso de unidades geoambientais integradas para o diagnóstico e monitoramento de indicadores ambientais. O autor combina a utilização destas unidades com uma série de índices e indicadores de qualidade ambiental com o propósito de tornar os mapas geotécnicos-geoambientais um instrumento mais adequado para representar as condições atuais de uma área e também para monitorar mudanças na qualidade ambiental.

A principal causa de instabilidade de encostas e escorregamentos no Estado de São Paulo é a chuva. O clima tropical a subtropical, com acumulados anuais que, nas regiões mais chuvosas, atingem médias de 200 mm/mês, com máximos absolutos entre 300 a 600 mm/mês e médias anuais locais de até 4500 mm/ano (Rolim *et al.* 2007), provocam, anualmente, a ocorrência de, pelo menos, uma centena de acidentes e desastres relacionados a escorregamentos (Ferreira *et al.* 2011, São Paulo 2015).

A definição dos índices pluviométricos deflagadores de escorregamentos constituem a base para emissão de alertas em planos preventivos

e de contingência, sendo esta correlação alvo de diversas pesquisas, como sintetizado em Soares (2006) e Parizzi et al. (2010). Estes trabalhos destacam, via de regra, a importância das relações entre diversos índices de chuva acumulada, quer sejam índices anuais (Cerri et al. 1996), mensais (DRM 2015), de quatro dias (Tatizana et al. 1987a, b, DRM 2015), de três dias (Macedo et al. 1999), de dois dias (Soares 2006, Soares & Martan 2006), de um dia (DRM 2015) ou horários (Tatizana et al. 1987a, b, Cerri 1993, Soares 2006, Soares & Martan 2006, Parizzi et al. 2010, DRM 2015).

Por outro lado, em nível internacional, existem vários exemplos de monitoramento direto de encostas sujeitas a escorregamentos em tempo real ou quase real que utilizam serviços WEB. Reid et al. (2012) caracterizam os fundamentos do monitoramento realizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) em doze sítios selecionados. Allasia et al. (2013) apresentam um sistema que inclui a aquisição de dados e execução de protocolos de transferência, análise, envio de mensagens de alerta por SMS e ou endereços eletrônicos e publicação automática dos resultados numa página da WEB. Anh et al. (2016) desenvolveram um sistema que utiliza a transferência de dados do pluviômetro por meio de protocolo de comunicação de celular 3G/2G. Os dados de chuva são utilizados para cálculo dos fatores de segurança que são comparados com limiares de níveis de alerta. Os dados monitorados podem ser observados em website e mensagens de alerta podem ser enviadas para telefones celulares.

Adicionalmente, a previsão meteorológica constitui outro elemento essencial para a emissão de alerta em tempo efetivo para a tomada de ações de gerenciamento de risco. No Plano Preventivo de Defesa Civil, específico para Escorregamentos nas Encostas da Serra do Mar - PPDC (São Paulo 1997, Macedo et al. 1999), a previsão meteorológica, juntamente com os índices pluviométricos e as vistorias de campo, é uma das variáveis para previsão dos processos de escorregamentos e estabelecimento dos níveis operacionais de Observação, Atenção, Alerta e Alerta Máximo. Cerri (1993) já destacava a importância da previsão meteorológica ao introduzir o conceito de Coeficiente de Precipitação Potencial que usa o valor da intensidade horária potencial com a precipitação acumulada nas 84 horas anteriores, a semelhança do Coeficiente de Precipitação Crítica de Tatizana et al. (1987a, b) para os valores acumulados de chuva.

Ainda que a chuva seja o principal deflagrador de escorregamentos no Estado de São Paulo,

o comportamento geológico-geotécnico dos terrenos, expresso pela suscetibilidade, perigo ou risco de escorregamentos, igualmente deve ser considerado nos modelos de correlação entre chuva e processos de escorregamentos.

Embora a premissa acima seja reconhecida em diversos trabalhos, a exemplo de Tatizana et al. (1987a,b), cujo modelo considera uma constante K dependente das condições geotécnicas das encostas e da intensidade dos escorregamentos, e de Parizzi et al. (2010), que descrevem as diferentes suscetibilidades do material geológico da região de Belo Horizonte, sua utilização, no Brasil, raramente é observada na elaboração de modelos de alerta ou na prática operacional de planos preventivos e de contingência de defesa civil.

Em nível nacional, um dos raros exemplos é o trabalho de Arruda Jr & Lopes (2013), que comparam os resultados de alertas para corridas de massa em sub-bacias considerando, ou não, o potencial de corrida e concluem que, quando as análises consideram o peso do potencial de corrida, os resultados são mais adequados do que aqueles que só utilizam os dados de chuva.

A plataforma TerraMA², desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (Lopes et al. 2011, Arruda Jr & Lopes 2014) é um sistema computacional para organização, análise, monitoramento e alerta de riscos de desastres. Ela é baseada em uma arquitetura de serviços aberta e disponibiliza a infraestrutura tecnológica necessária para a estruturação de um sistema operacional de monitoramento e alerta, podendo atender diversas aplicações em áreas como qualidade do ar, qualidade da água, gasodutos, barragens de rejeito em área de mineração, incêndios florestais, e estiagens. A permissão para sua redistribuição e/ou modificações encontra-se sob os termos da Licença Pública Geral do GNU (GPL), publicada pela Free Software Foundation.

O objetivo do trabalho é apresentar modelo de protótipo de sistema de monitoramento, em tempo quase real, para emissão de alertas de desastres, combinando o mapeamento de risco de escorregamento planar, desenvolvido com base em unidades espaciais de análise, com índices de chuva acumulada e chuva prevista, deflagradores de processos perigosos de escorregamentos planares.

A área de abrangência do trabalho inclui os municípios de Ubatuba, Caraguatatuba, São Sebastião e Ilhabela, do Litoral Norte do Estado de São Paulo (Figura 1).

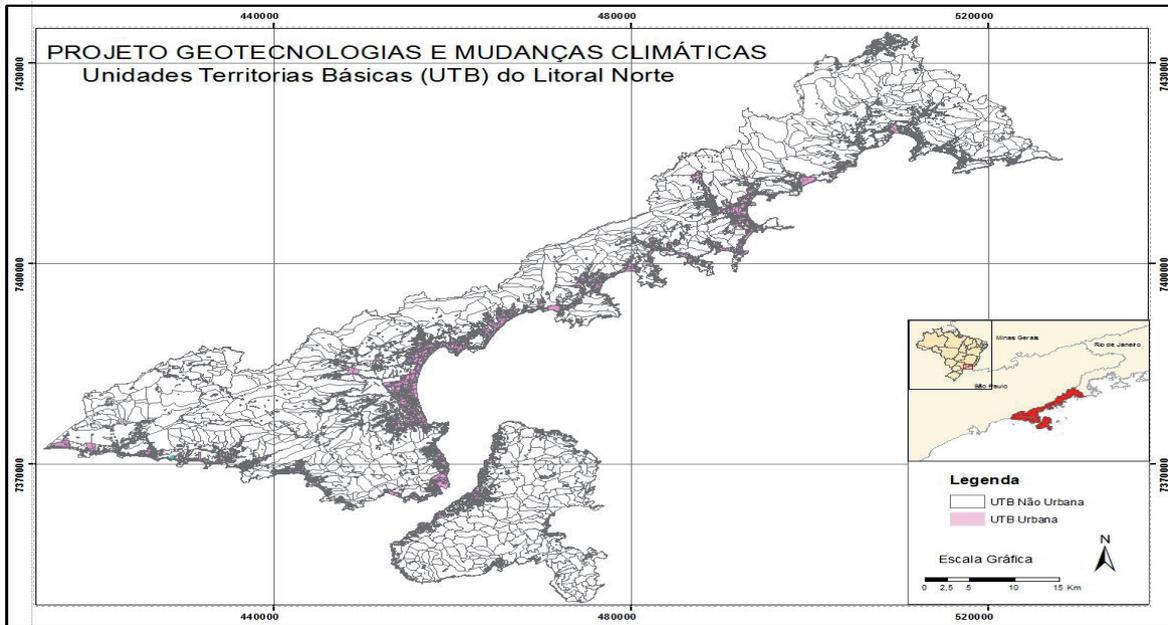


Figura 1 - Localização e abrangência da área de estudo e distribuição das unidades espaciais de análise, com destaque para aquelas de uso urbano.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A organização, tratamento e análise dos dados foi feito com base na plataforma TerraMA² e seus programas computacionais de apoio ou dependências. Este sistema apresenta a potencialidade de coletar, em tempo real, dados meteorológicos

dinâmicos disponíveis em servidores de acesso conectados à internet e realizar análises a partir da sobreposição desses com os objetos monitorados e outros dados adicionais, que constituem a base de dados estáticos. A Figura 2 apresenta a estrutura e os atributos utilizados para organização e análise dos dados estáticos e dinâmicos.

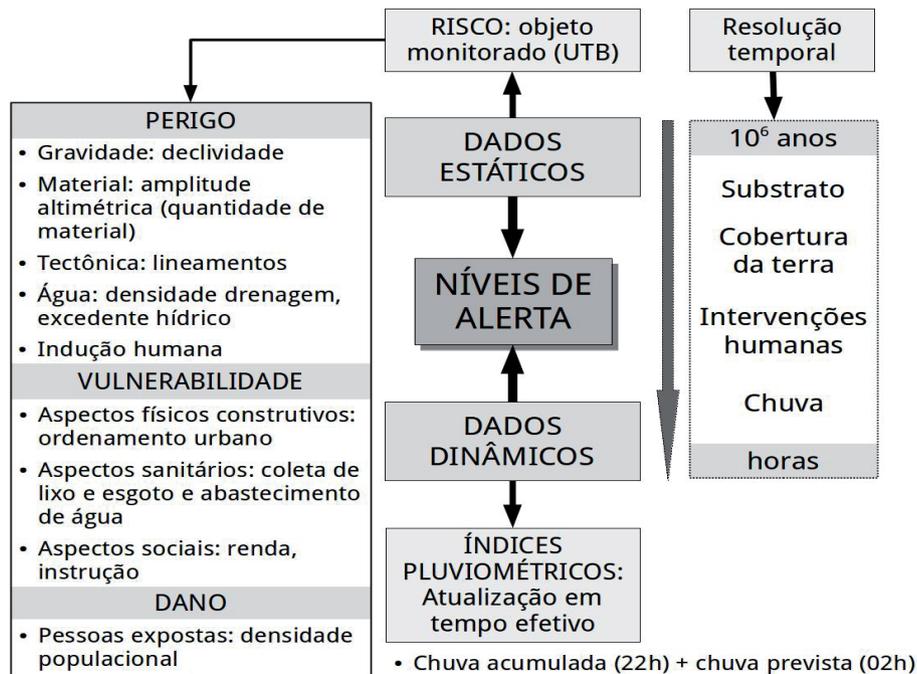


Figura 2 - Estrutura e atributos utilizados para organização e análise dos dados estáticos e dinâmicos.

2.1 Plataforma TerraMA²

A plataforma TerraMA² constitui uma base tecnológica que permite integrar informações geoambientais e modelagem para o monitoramento, análise e alerta de riscos ambientais e que inclui cinco tipos de serviços: a) busca de dados atuais através da internet e seu carregamento na base de dados do sistema de alerta; b) tratamento e análise em tempo real de dados novos e verificação da existência de situações de risco, através de uma comparação com mapas de risco ou de um modelo definido; c) serviço responsável pelo objeto monitorado; d) serviços para executar, editar e criar novos modelos de risco e alerta; e) criação e notificação de alerta para os usuários do sistema em operação (INPE 2013a).

O sistema possui três módulos principais (INPE 2013a). O módulo de Administração é responsável pela configuração de cada serviço da plataforma, incluindo a definição do endereço e a porta de cada serviço, o local em que as imagens com o resultado das análises serão armazenadas, definição do banco de dados, local de armazenamento dos dados coletados, configuração do servidor de email, definição dos arquivos de log e outras informações. O módulo de Configuração é responsável pela definição de como os dados são obtidos dos servidores externos, a definição das análises, e quais alertas serão enviados. O módulo de Apresentação WEB é responsável pela apresentação de alertas quando uma situação de risco é detectada pelo módulo de análise. O módulo consiste em uma aplicação web que está conectada ao banco de dados TerraLib. É capaz de apresentar as camadas associadas à análise, seus dados, histórico de alertas e metadados.

O ambiente tecnológico planejado para o desenvolvimento deste projeto apresenta a instalação da plataforma em ambiente local, em um computador *desktop* utilizado para construção da base de dados e teste das regras e outra instalação em ambiente de computação em nuvem para hospedar uma versão do algoritmo de análise e realizar as atividades de monitoramento - com download das informações necessárias, análise a partir das regras estabelecidas no algoritmo e envio de informações para os operadores do alerta, os quais terão acesso aos mapas gerados na simulação a partir da web.

Para utilização do TerraMA² é necessário instalar dependências, todas disponíveis gratuitamente. As dependências são: Servidor de Banco de Dados PostgreSQL ou Servidor de Banco de Dados MySQL, Servidor Http Apache, Java 7, Apache Web Java Tomcat, Aplicativo TerraView e Servidor WEB TerraOGC (INPE 2013b).

2.2 Definição da Base de Dados Estáticos - Análise de Risco

A base de dados estáticos foi estruturada a partir da avaliação de risco de escorregamento fundamentada na abordagem de paisagem. O mapeamento de risco em escala regional 1:50.000 foi realizado com base na metodologia descrita em Ferreira & Rossini-Penteado (2011).

Esta abordagem implica na definição de unidades espaciais de análise resultantes da integração dinâmica de componentes relativamente homogêneos de suporte e cobertura, compreendendo elementos físicos (processos geológicos, pedológicos, geomorfológicos e climatológicos), biológicos (vegetação) e antrópicos (sistemas socioeconômicos e de infraestrutura) que descrevem e qualificam os processos perigosos em análise.

Neste trabalho, a unidade de paisagem recebeu a denominação de Unidade Territorial Básica (UTB), seguindo a terminologia de Lucena (1998) e BRASIL (2006). As UTB, que representam as menores unidades de análise na escala adotada, expressando o conceito geográfico de zonalidade, resultam da intersecção dos planos de informação de Unidades Básicas de Compartimentação do Meio Físico (UBC) e de Unidades Homogêneas do Uso e Cobertura da Terra e padrão da Ocupação Urbana (UHCT).

As UBC refletem as características do substrato geológico-geomorfológico-pedológico. O substrato resulta da evolução de processos geodinâmicos endógenos e exógenos. O estudo de suas características permite identificar e caracterizar os fenômenos perigosos e suas relações com os padrões de uso e ocupação do solo na definição dos impactos e vulnerabilidades do cenário de risco.

As UBC foram definidas a partir da fotointerpretação de imagem Landsat TM5, de resolução 30m e de imagem de relevo sombreado obtida a partir de modelo digital de superfície, de

resolução 5m (EMPLASA, 2010b). A escala de interpretação foi em torno de 1:50.000. Esta etapa baseou-se no processo de observação, identificação e delimitação visual de regiões homogêneas com base em variações de elementos texturais das imagens, como densidade, padrão ou arranjo espacial, tropia e forma, conforme descrito em Vedovello (2000), Tominaga et al. (2004, 2008), Oliveira et al. (2007), Cardoso et al. (2009), Fernandes da Silva et al. (2010), Ferreira & Rossini-Penteado (2011), Ferreira et al. (2013).

As diversas atividades humanas implicam em ações sobre o meio físico que modificam a paisagem. Os diferentes tipos de uso e cobertura da terra, resultantes deste processo, imprimem padrões espaciais de ocupação que atuam como elementos intrínsecos à análise e mapeamento de risco, condicionando as três variáveis da equação de risco (perigo, vulnerabilidade e dano potencial). As UHCT, definidas por processos de classificação automática e interpretação visual de produtos de sensoriamento remoto de média e alta resolução espacial (EMPLASA 2010a), foram obtidas a partir da setorização ou parcelamento do território em áreas com características semelhantes quanto a determinados aspectos físicos, forma e textura referentes à ocupação e que se destacam no nível de detalhamento da escala de trabalho (Rossini-Penteado et al. 2007, 2008, Ferreira & Rossini-Penteado 2011).

O plano de informação representativo das UTB inclui um conjunto de polígonos georreferenciados associados a um banco de dados alfanumérico que contém os atributos descritivos de cada unidade relacionados aos aspectos físicos, socioeconômicos e de infraestrutura, os quais constituem a base para o cálculo dos índices aplicados ao modelo de risco adotado (Ferreira & Rossini-Penteado 2011, Ferreira et al. 2013). O processo de obtenção das informações e dos produtos derivados inclui consultas, seleção e combinação dos atributos de interesse. Foram calculados os índices relacionados às variáveis: perigo (P) de escorregamento, vulnerabilidade (V), dano potencial (D) e risco (R) como mostra a Figura 2.

Neste projeto, a metodologia numérica aplicada à análise de risco de escorregamento, baseada no estabelecimento de regras de classificação,

fórmulas e cálculo dos índices relacionados aos fatores de análise considerados para cada variável da equação do risco, viabilizou a definição dos setores de risco vinculados a cada unidade gráfica de uso urbano do tipo residencial, comercial e serviços, com diferentes graus de riscos divididos em cinco classes de risco, variando de Muito Baixo ou Nulo (R0) até Muito Alto (R4) risco de escorregamento.

2.3 Definição da Base de Dados Dinâmicos - Índices Pluviométricos

A base de dados dinâmicos requeridos no sistema inclui as informações relacionadas às condições das variáveis em determinado período de tempo. A definição do modelo indicou a necessidade de coletar informações de previsão de chuva e do total de chuva observado. A carga dos dados dinâmicos é feita a partir do serviço de coleta, e os parâmetros de funcionamento são definidos no módulo de configuração.

Os dados de observação são de responsabilidade da DSA - Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais e do SINDA - Sistema Integrado de Dados Ambientais, ambos do INPE e os de previsão numérica do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC do INPE (INPE 2013a, 2014).

Os dados de observação disponíveis e selecionados para utilização na plataforma TerraMA² são: precipitação estimada por satélite GOES (resolução aproximada de 4km) e pelo radar meteorológico de São Roque, ambos com capacidade de atualização de 15 minutos.

A plataforma TerraMA² utiliza o modelo Hidroestimador que é um método inteiramente automático de cálculo das taxas de precipitação em tempo real. O Modelo Hidroestimador produz estimativas da taxa de chuva para cada imagem do satélite GOES recebida no CPTEC/INPE (Vila et al. 2003, Avila 2006, INPE 2014).

Os dados de previsão derivam do modelo ETA 5km (Projeto Serra do Mar) que disponibiliza os valores da previsão de chuva horária, em mm, para as 72h seguintes para cada célula de informação de 5km. O arquivo contendo o resultado do modelo de previsão de chuva é atualizado a cada 12h no servidor FTP do CPTEC/INPE com o

conjunto de células abrangendo a região sudeste do Brasil (INPE 2013a, 2014).

A configuração dessas fontes de dados dinâmicos habilita o serviço de coleta a verificar novos dados, baixar as informações para um diretório local e dar a carga no banco de dados na forma de planos de informação no formato matricial ou grade numérica com os acumulados de chuva em 22 horas e a previsão de chuva nas próximas duas horas. Foi criado um filtro espacial dado pelo polígono delimitador do projeto para pré-processamento dos dados e descarte dos situados fora da área de interesse. Os diretórios para armazenamento temporário dos dados, bem como os arquivos de log dos serviços (para ajuda na resolução de eventuais falhas de funcionamento) são configurados no módulo de administração.

2.4 Configuração e Implementação do Modelo de Análise

O desenvolvimento do modelo de análise e elaboração do seu algoritmo pressupôs a definição inicial do objeto a ser monitorado; além da identificação das variáveis dinâmicas de chuva relevantes para o processo de análise e da definição das regras e dos pesos atribuídos a cada variável que implicam na mudança de estado dos alertas.

Para a definição do algoritmo de análise, inicialmente foi efetuada a integração da informação estática, representada pelo plano de informação contendo os diferentes níveis ou graus de risco de ocorrência de escorregamento, com as variáveis do monitoramento dinâmico das condições meteorológicas, definidas anteriormente.

A base de dados estáticos foi carregada com a plataforma no aplicativo TerraView e implantada no Banco de Dados PostgreSQL.

As unidades ou elementos gráficos definidos pelas Unidades Territoriais Básicas (UTB) do tipo residencial-comercial-serviços foram definidas como o objeto a ser monitorado, pois considerou-se a população como elemento em risco. Desta forma, as áreas não edificadas foram

desconsideradas na avaliação de risco devido à inexistência do elemento em risco adotado.

Para a configuração do algoritmo de análise automatizada foram utilizadas quatro classes de risco: R1 - Baixo; R2 - Médio; R3 - Alto e R4 - Muito Alto. A classe de risco R0 - Muito Baixo a Nulo não foi considerada no algoritmo, pois a probabilidade de ocorrência do processo é praticamente nula.

No modelo de análise foi considerado um único índice pluviométrico indicativo da chuva em 24 horas que combina tanto a chuva acumulada como a chuva futura para disparar um alerta em cada UTB. Inicialmente foi testada a soma do total de chuva acumulada de 23 horas com o total de chuva prevista em uma hora.

Posteriormente, para a obtenção do índice de análise foi considerada a soma do acumulado de chuva das últimas 22 horas e a previsão de chuva para as próximas 2 horas. A expansão para duas horas proporciona um período de tempo maior para que medidas preventivas e de contingência possam ser tomadas adequadamente e em tempo hábil. Este índice, combinado com as diferentes situações de risco expressas em cada UTB, define as condições de cada nível de alerta.

Para operacionalizar o modelo e viabilizar a definição das regras e dos pesos de cada variável considerada, foi construída uma matriz de correlação entre os intervalos de chuva (dados em mm) e os graus de risco de escorregamento da área de estudo. Cada célula desta matriz, representada na Figura 4, apresenta os níveis de alerta em cada UTB de uso residencial-comercial-serviços, tendo em vista os parâmetros de chuva fornecidos pelas variáveis dinâmicas do sistema.

A Figura 3 apresenta um exemplo da estrutura básica do código efetuada em Lua, a linguagem de programação nativa da plataforma e descreve a lógica do modelo de análise. A Figura 4 exibe o código completo elaborado para a programação da análise utilizada. Os valores numéricos resultantes de cada análise são entregues à plataforma para emissão de boletins e alertas para usuários cadastrados.

```

Para cada poligono de UTB com risco variando de R1 a R4
chuva_acum_dia = Maximo_valor_chuva_na_UTB_acumulado(22h)
Max_previsao_chuva = máxima_chuva_celula_dentro_UTB(previsão 2h)
Soma_chuva = (chuva_acum_dia + Max_previsao_chuva)
Se (soma_chuva > 0mm) e (soma_chuva <= 40mm)
    Se risco = R1
        Status = observação
    Se risco = R2
        Status = observação
    Se risco = R3
        Status = observação
    Se risco = R4
        Status = observação
Fim do Se
/* teste continua sendo aplicado a cada faixa de valores de chuva na matriz */
Fim do Para cada poligono
    
```

Figura 3 - Exemplo da estrutura básica do código, descrevendo o método lógico de programação da análise.

```

-- Script: Alerta para a análise de risco de escorregamento
-- Matriz de regras (Mínimo e Máximo da faixa e quatro níveis de alertas associados)
matriz = {
    {min=0, max=40, R={0,0,0,0} },
    {min=40, max=60, R={1,1,1,2} },
    {min=60, max=80, R={1,2,2,2} },
    {min=80, max=100, R={1,2,2,3} },
    {min=100, max=120, R={2,2,3,3} },
    {min=120, max=140, R={2,3,3,4} },
    {min=140, max=160, R={3,3,4,4} },
    {min=160, max=180, R={3,4,4,4} },
    {min=180, max=999, R={4,4,4,4} }
}
-- Parâmetros
local PERIODO_ACUMULADO = 22 -- horas de acumulação de chuva
local PERIODO_PREVISAO = 2 -- horas de previsão
-- Valores
local max_h_h = prec_max_historico_grid('hidro', PERIODO_ACUMULADO) or 0
local max_e_p = maximo_eta('Prec_eta5km', PERIODO_PREVISAO) or 0
local idx
-- soma da chuva das ultimas 22h acumuladas e as próximas duas horas
local soma = max_h_h + max_e_p
-- Aplicação das regras
-- idx representa o índice em faixa.R[]
-- r_esc_cl é o atributo do poligono de risco com a classe RI, RII, RIII ou RIV
for n_faixa in ipairs(matriz) do
    if (faixa.min <= soma) and (soma < faixa.max) then
        if r_esc_cl == "RI" then
            idx = 1
        elseif r_esc_cl == "RII" then
            idx = 2
        elseif r_esc_cl == "RIII" then
            idx = 3
        elseif r_esc_cl == "RIV" then
            idx = 4
        end
        -- retorna o indicador de nível de alerta de acordo com a matriz de regras.
        return faixa.R[idx]
    end
end
end
    
```

Figura 4 - Estrutura completa do código de programação na linguagem de análise Lua.

A plataforma TerraMA2 possui quatro níveis de alerta predefinidos, representados por valores numéricos (1, 2, 3 e 4) que indicam, respectivamente, os estados de observação, atenção, alerta e alerta máximo. Estas classes e terminologia foram mantidos no presente trabalho, pois compõem os níveis operacionais vigentes do PPDC-Serra do Mar (São Paulo 1997, Macedo et al. 1999).

O modelo proposto tem estrutura matricial que correlaciona nas colunas, as quatro classes ou graus de risco e, nas linhas, os intervalos do índice pluviométrico de 24 horas, dividido em nove intervalos (Figura 5). Cada célula da matriz representa os diferentes níveis de alerta com os seguintes significados:

SOMA DA CHUVA ACUMULADA E FUTURA EM 24H (mm)	CLASSES DE RISCO			
	R1	R2	R3	R4
0<=S<40	N1	N1	N1	N1
40<=S<60	N1	N1	N1	N2
60<=S<80	N1	N2	N2	N2
80<=S<100	N1	N2	N2	N3
100<=S<120	N2	N2	N3	N3
120<=S<140	N2	N3	N3	N4
140<=S<160	N3	N3	N4	N4
160<=S<180	N3	N4	N4	N4
S>=180	N4	N4	N4	N4

NÍVEIS DE ALERTA

N1 - Observação **N2 - Atenção** **N3 - Alerta** **N4 - Alerta Máximo**

Figura 5 – Correlação entre classes de risco (dados estáticos) e chuva acumulada e futura em 24 horas (dados dinâmicos) para definição dos níveis de alerta. Convenções Classes de Risco: R1 - Baixo; R2 - Médio; R3 - Alto e R4 - Muito Alto.

O nível de alerta 1 (Observação) é aquele onde a ocorrência de escorregamentos não é esperada, podendo raramente ocorrer escorregamentos induzidos. Além disso, destacam-se as situações de vulnerabilidade muito baixas, o que representa baixa complexidade no gerenciamento do risco por parte do poder público local. A Figura 5 mostra que para um índice pluviométrico menor que 40mm, o nível de alerta 1 (Observação) é deflagrado em todas as situações ou graus de risco. Entretanto, com o aumento gradual do índice pluviométrico ocorre uma consequente variação no nível de alerta, ou seja, nos casos em que o índice pluviométrico varia entre 40-60mm, o nível de alerta 1, permanece apenas para as situações de risco R1, R2 e R3; nos casos em que o índice pluviométrico varia entre 60-100mm, o nível de alerta 1 permanece apenas para as situações de risco R1. Acima de 100mm de chuva em 24 horas, essa situação deixa de ocorrer, sendo deflagrados níveis de alerta mais altos, que indicam situações mais complexas para o gerenciamento.

O nível de alerta 2 (Atenção) representa os casos onde se espera a ocorrência de escorregamentos induzidos de forma esparsa, normalmente movimentando pequenos volumes de material,

caracterizados pelas condições de vulnerabilidade baixa a moderada, representando um aumento da complexidade no processo de gerenciamento do risco, mas ainda dentro das capacidades institucionais locais de gerenciamento da situação. Este nível de alerta começa a ser deflagrado nos casos em que se verifica um índice pluviométrico variando entre 40-60mm e situações de risco R4; estende-se às classes de risco R2 e R3 com o aumento do índice pluviométrico para o intervalo de 60-100mm e às áreas de risco R1 em intervalos de chuva entre 100-140mm. Acima de 140mm de chuva em 24 horas essa situação deixa de existir em decorrência da deflagração de níveis de alerta mais complexos.

No nível de alerta 3 (Alerta) espera-se a ocorrência de escorregamentos esparsos a generalizados, alguns de magnitude variando de moderada a alta em áreas onde as condições de vulnerabilidade variam de moderada a alta, ocasionando um consequente aumento da complexidade de gerenciamento do risco, muitas vezes acima da capacidade do poder público local. Observa-se que este nível de alerta (Figura 5) ocorre nas classes de risco R4, entre os índices pluviométricos 80-120mm e entre os níveis pluviométricos

100-140mm, 120-160mm e 140-180mm, respectivamente para as situações de risco R3, R2 e R1. Acima de 180mm de chuva em 24 horas essa situação deixa de ocorrer em detrimento da deflagração de nível de alerta mais complexo.

No nível 4 (Alerta Máximo) espera-se a ocorrência de escorregamentos generalizados, muitos de magnitude variando de alta a muito alta e em condições de vulnerabilidade alta a muito alta, onde destaca-se o aumento proporcional da complexidade de gerenciamento do risco, em níveis acima da capacidade do poder público local. Este nível de alerta ocorre nos casos de índice pluviométrico acima de 120mm, 140mm, 160mm e 180mm, respectivamente para as situações de risco R4, R3, R2 e R1.

A versão inicial para homologação do sistema foi implantada na plataforma de Cloud Computing da Amazon utilizando um servidor Microsoft Windows 2012 e um banco de dados PostgreSQL 9.0. A versão final do sistema está implantada em um servidor físico, no ambiente de TI do Instituto Geológico, rodando sob Windows Server 2012 e utilizando como servidor web o software Apache Tomcat. O banco de dados PostgreSQL, versão 9.0 de 32 bit, com a extensão espacial PostGIS 1.5, foi adotado após diversos testes concluírem ser esta a

melhor compatibilidade para o sistema. Um endereço IP fixo fornece o acesso à aplicação, por meio dos navegadores de mercado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapa de risco de escorregamentos planares do Litoral Norte (Figura 6) reflete as variações nos cenários de perigo de escorregamentos planares rasos, vulnerabilidade de áreas residenciais-comerciais-serviço e dano potencial (expresso pela densidade populacional e sua exposição frente aos perigos).

As unidades territoriais de uso do tipo residencial-comercial-serviços, que constituem os elementos em risco para os quais foram calculados os graus de risco, representam 6% da área total do Litoral Norte, ou seja, 120km². A maior parte dos elementos em risco analisados ocorre nas planícies litorâneas, onde é pouco provável que sejam deflagrados processos de escorregamentos, o que justifica o fato de aproximadamente 78% da área de estudo ter sido classificada como de risco muito baixo a nulo (R0). Cerca de 19% das áreas foram classificadas como sendo de risco baixo (R1), 2% como sendo de risco médio (R2) e apenas 1% como sendo de risco alto e muito alto (classes R3 e R4).

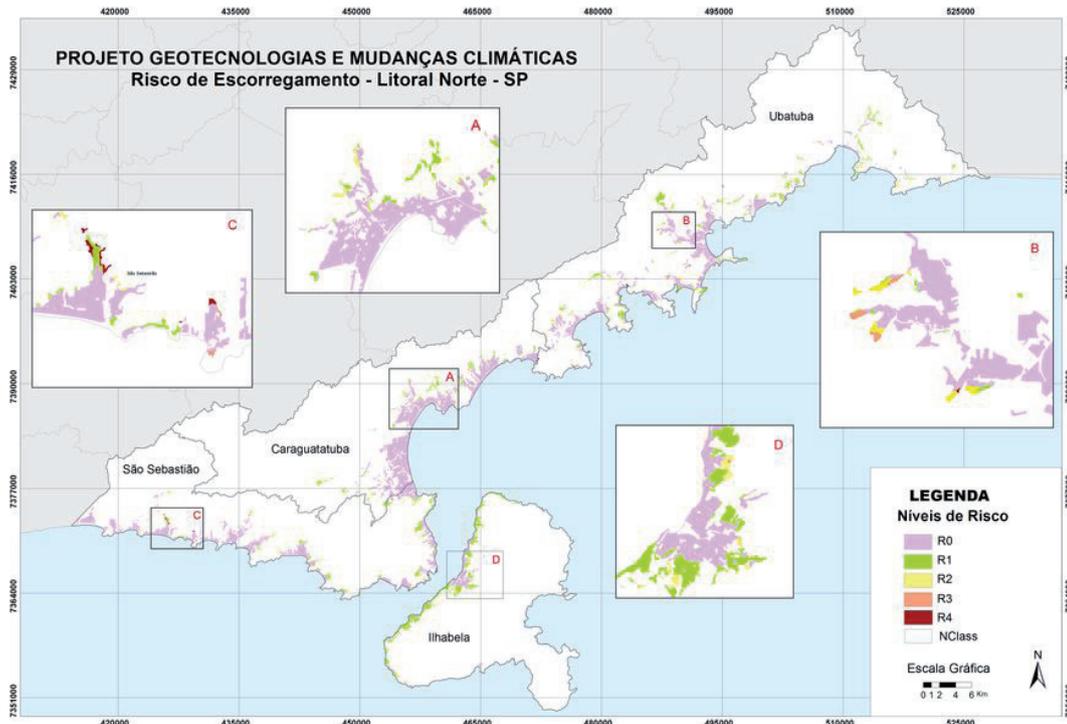


Figura 6 – Mapa de risco de áreas residenciais-comerciais-serviços a escorregamentos planares rasos do Litoral Norte do Estado de São Paulo. R0-R4: classes de risco (ver texto). NClass: áreas não classificadas pela inexistência do elemento em risco.

As áreas classificadas como de risco muito alto (R4) correspondem a aproximadamente 0,16% da área urbana de uso residencial/comercial/serviços e apresentam maior concentração no município de São Sebastião e, secundariamente, em Ubatuba. Não foi observada a ocorrência de áreas de risco muito alto nos municípios de Caraguatatuba e Ilhabela. Nesta classe espera-se a ocorrência de escorregamentos esparsos mesmo com índices de chuva baixos que vão aumentando de frequência e magnitude assim que ocorre o aumento dos níveis pluviométricos, causando escorregamentos severos e cada vez mais generalizados, geralmente em áreas de vulnerabilidade alta a muito alta e com grande número de pessoas expostas.

O risco alto (R3) corresponde a 0,64% da área urbana de uso residencial/comercial/serviços do Litoral Norte. Há um predomínio desta classe no município de Ubatuba, seguido por São Sebastião, Ilhabela e Caraguatatuba. Nesta classe a ocorrência

de escorregamentos esparsos ocorre com níveis de chuvas mais altos que a classe R4 que vão aumentando de frequência e magnitude assim que ocorre o aumento dos índices pluviométricos de chuva, geralmente em áreas de vulnerabilidade moderada a alta e com alto a médio número de pessoas expostas.

As áreas com graus de risco médio (R2) e baixo (R1) e, portanto, menos críticas ou suscetíveis a ocorrência de processos perigosos, representam cerca de 21% das áreas de uso residencial/comercial/serviços. Nestas classes, escorregamentos esparsos ocorrem apenas com altos níveis pluviométricos e somente evolui para escorregamentos severos e generalizados em condições de chuva excepcionais, sob condições de vulnerabilidade moderada a baixa e com baixos números de pessoas expostas.

A Figura 7 mostra exemplos do mapeamento de risco sobre ortofotos digitais e fotos de campo.

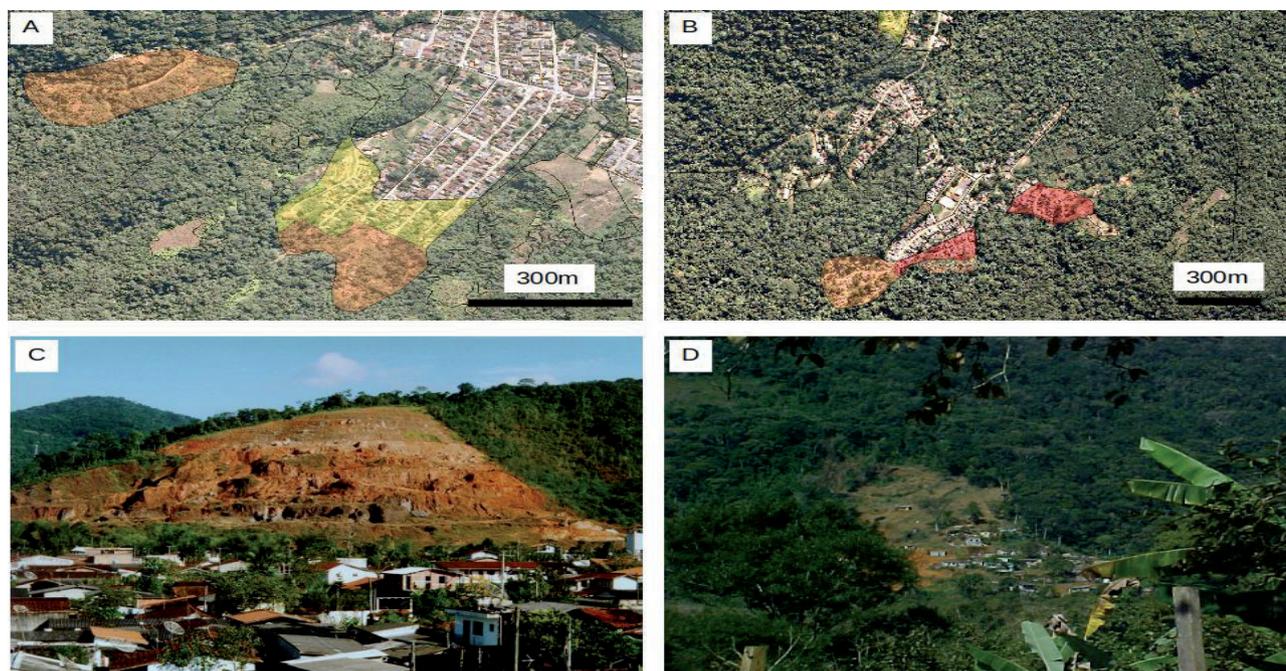


Figura 7 - Exemplos do mapeamento de risco sobre ortofotos digitais (A; B) e fotos de campo (C; D). A, C: bairro Ipiranguinha, Ubatuba. C, D: bairro Sesmarias, Ubatuba. Convenções: Risco Muito Alto (R4) - polígonos de cor vermelha; Risco Alto (R3) - polígonos de cor laranja; Risco Médio (R2) - polígonos de cor amarela.

Os mapas de risco em escala regional aplicam-se principalmente ao planejamento e implantação de políticas públicas de convivência e redução do risco, seja para o planejamento de obras, redução da vulnerabilidade, implantação de planos de contingência ou priorização de áreas para

estudos de detalhe local. No presente trabalho, o mapa de risco obtido pelas UTB, em combinação com os índices pluviométricos, foi utilizado como objeto monitorado para o estabelecimento de níveis de alerta ao risco de escorregamentos. Esta abordagem, reconhecida em diversos trabalhos, a

exemplo de Tatizana et al. (1987a, b), raramente é utilizada no Brasil para a elaboração de modelos de alerta ou na prática operacional de planos preventivos e de contingência de defesa civil, os quais optam por utilizar essencialmente os dados de chuva.

A abordagem proposta difere das atualmente em uso, as quais consideram a correlação entre dois índices pluviométricos, geralmente a intensidade horária acumulada versus o acumulado de um dia (Kay & Chen 1995, DRM 2015), ou de dois dias (Soares 2006, Soares & Martan 2006), ou de quatro dias (Tatizana et al. 1987a, b).

O modelo desenvolvido tem como premissa a utilização das áreas de risco como fator fundamental para a definição dos níveis de alerta, apresentando o mesmo nível de influência que os índices pluviométricos para deflagrar o alerta, o que difere dos modelos anteriores que somente consideram os índices pluviométricos. O presente trabalho procura incorporar o conhecimento decorrente do avanço dos métodos de mapeamentos de risco na última década (São Paulo 2015) para aperfeiçoar os modelos de correlação entre chuva e escorregamentos, como já destacado nos trabalhos de Tatizana et al. (1987a, b).

No processo de gerenciamento de risco a previsibilidade de eventos é indispensável para a redução dos danos. Portanto, outro aspecto relevante do modelo preconizado que deve ser destacado corresponde à associação do indicador de chuva antecedente ou acumulada e de chuva futura ou prevista em um único índice pluviométrico.

Esta abordagem foi proposta por Cerri (1993) que introduziu o conceito de Coeficiente de Precipitação Potencial e retomada por Soares (2006). A diferença é que, nos trabalhos propostos, foi utilizada uma razão entre os índices de chuva prevista e acumulada, ao invés da soma.

Atualmente a previsão numérica do tempo é realizada por meio de modelos atualizados a cada 12 horas e que avançam até 72 horas (INPE 2014). Os dados gerados pelo CPTEC-INPE já estão configurados para uso na plataforma TerraMA². O algoritmo elaborado é facilmente ajustável, permitindo a reconfiguração do modelo, seja através de novas combinações entre os índices de chuva acumulada e prevista, seja através da atribuição de novos pesos às variáveis, conforme o interesse e necessidade.

No modelo utilizado foi adotada a proporção de 22 horas de chuva acumulada e de 2 horas de chuva prevista; entretanto, outros arranjos podem ser testados e avaliados. O índice pluviométrico de 24 horas foi adotado devido à forte correlação entre chuvas de alta intensidade e de pequena duração com os escorregamentos planares rasos (Mendes & Valério Filho 2015), modelados na análise de risco e por incorporar rapidamente a intensidade de chuva horária. Reconhece-se, no entanto, que para processos de escorregamentos mais complexos, o papel de acumulados de chuva maiores que 24 horas pode ser importante. Nesses casos, o sistema de monitoramento apresentado é flexível o suficiente para modelar diferentes cenários de influência de chuva acumulada em intervalos de tempo maiores, seja de três, quatro, quinze ou trinta dias e combiná-los com o modelo de 24 horas proposto, conforme necessário.

O modelo apresentado utiliza nove intervalos para o índice pluviométrico, os quais são correlacionados com as quatro classes de risco. Como limite inferior foi considerado um índice 24 horas de 40mm e um aumento sucessivo de 20mm para cada novo intervalo até a faixa maior que 180mm.

O valor inicial definido se aproxima do valor de 39,6mm/h de intensidade de chuva obtido por Mendes & Valério Filho (2015) para a correlação entre chuva e escorregamentos em Ubatuba. No modelo operado pelo Departamento de Recursos Minerais para o sistema de alerta a escorregamentos do Estado do Rio de Janeiro (DRM 2015), o valor de 35mm/h de intensidade de chuva, está bem próximo ao utilizado. Outra correlação utilizada para o estabelecimento do valor de 40mm para o índice pluviométrico decorre do índice de 120mm/72horas utilizado no PPDC-Serra do Mar (São Paulo 1997, Macedo et al. 1999), o que resulta em um valor médio acumulado de 40mm/dia.

Em relação ao limite superior, considera-se que um índice pluviométrico acima de 180mm/24horas já é suficiente para deflagrar escorregamentos planares em qualquer condição de risco. Esse limite situa-se em torno da inflexão da alta inclinação para a quase horizontalidade das curvas envoltórias de Tatizana et al. (1987a, b), indicando a ocorrência de escorregamentos para qualquer intensidade de chuva horária. Esse limite já contém, também, a maioria dos eventos da

classe de escorregamentos severos, apresentado por Kay & Chen (1995).

A variação constante de 20mm de chuva entre os limites mínimo e máximo foi selecionada arbitrariamente, a exemplo da prática operacional do PPDC-Serra do Mar que adota os limites de 120mm, 100mm e 80mm para diferentes regiões do Estado (São Paulo 1997, Macedo et al. 1999).

Dentre as vantagens do modelo desenvolvido na forma de matriz, destacam-se: a maior facilidade de visualização e entendimento dos critérios de entrada e saída de cada nível operacional de alerta, quando comparado ao uso de fórmulas e gráficos, além de tornar mais simples o processo de modificação e atualização do algoritmo por meio da linguagem Lua. Esta estrutura matricial evidencia que, à medida que aumentam os índices pluviométricos, ocorre um gradativo aumento da magnitude dos processos ou da vulnerabilidade, levando a situações de gerenciamento de risco cada vez mais complexas, e também uma ampliação progressiva das áreas de risco que podem ser atingidas pelos eventos perigosos.

Um possível problema associado ao modelo proposto corresponde à eventual subestimação da chuva pelo satélite GOES, especialmente em situações em que não há formações frias com cristais de gelo como apontado por Avila (2006) e Arruda Jr & Lopes (2013). Para dimensionar este efeito pode-se configurar o recebimento de dados de chuva por meio de Plataformas de Coleta de Dados (PCD) que são equipamentos automáticos que dispõem de sensores eletrônicos capazes de realizar medições periódicas de precipitação. Atualmente, a plataforma TerraMA² já utiliza algumas PCD de responsabilidade do CPTEC/INPE, sendo uma delas situada em Picinguaba, no município de Ubatuba (INPE 2013a).

Deve-se destacar que o sistema desenvolvido abrange um monitoramento em escada regional, quer seja pela fonte dos dados pluviométricos (satélite GOES), quer seja pelo mapeamento de risco. O sistema não monitora sítios específicos de escorregamentos ativos como descrito internacionalmente (Reid et al., 2012; Allasia et al., 2013, Anh et al., 2016).

O protótipo do sistema elaborado deverá, no decorrer do tempo, ser avaliado por meio da comparação com eventos de escorregamentos

registrados na região e discutido sua aplicabilidade na gestão de risco da região.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de monitoramento, em tempo quase real, para emissão de alertas de desastres que combinou o mapeamento de risco de escorregamento planar, efetuado a partir de unidades espaciais de análise com índices de chuva acumulada e chuva prevista, deflagradores dos processos perigosos.

O algoritmo definido e implementado para o monitoramento de riscos se mostrou compatível com a arquitetura da plataforma TerraMA². A utilização de polígonos com índices pré-calculados, resultantes da avaliação e estabelecimento de critérios desenvolvidos, viabiliza uma abordagem mais eficiente e adequada à automatização. A utilização de uma estrutura de dados em forma de matriz de regras, associando as faixas de chuva com as classes de riscos, tornou o algoritmo altamente flexível e com amplas possibilidades de modificação e atualizações, a partir de pequenas variações no script desenvolvido.

O modelo exposto tem como premissa a utilização das áreas de risco como fator fundamental para a definição dos níveis de alerta, apresentando a mesma relevância que os índices pluviométricos para deflagrar o alerta. Além disso, o modelo incorpora o conhecimento decorrente do avanço dos métodos de mapeamentos de risco verificado na última década no Estado de São Paulo.

O índice pluviométrico utilizado sintetiza dois aspectos fundamentais necessários para a deflagração de processos perigosos e seu gerenciamento: a chuva acumulada (ou antecedente) e a chuva futura (ou prevista).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pelo apoio financeiro ao projeto *Aplicação de geotecnologias na orientação do uso da terra com base nos impactos das mudanças climáticas globais: sub-bacias hidrográficas litorâneas do Estado de São Paulo e do Estado do Rio de Janeiro* (Processo FAPESP 2011/50219-3).

REFERÊNCIAS

- ALLASIA P., MANCONI A., GIORDAN D., BALDO M., LOLLINO G. 2013. ADVICE: A New Approach for Near-Real-Time Monitoring of Surface Displacements in Landslide Hazard Scenarios. *Sensors*, v. 13, p. 8285-8302; doi:10.3390/s130708285.
- ANH G.Q., DINH-CHINH N., DUC-NGHIA T., DUC-TAN T. 2016. Monitoring of Landslides in Mountainous Regions Based on FEM Modelling and Rain Gauge Measurements. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, v. 6, n. 5, p. 2106-2113. ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v6i5.10482.
- ARRUDA JR E.R., LOPES, E.S.S. 2013. Análise morfológica em sub-bacias hidrográficas para monitoramento do risco potencial a corridas de massa (debris flows) na região serrana do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 14, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. CDROM.
- AVILA A.M.H. 2006. Estimativa de precipitação em regiões tropicais utilizando imagens do satélite GOES 12. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade De Engenharia Agrícola, 2006. Disponível em: http://www.cpa.unicamp.br/producao/teses-de-doutorado/2006/tese_final_ana.pdf/download.pdf. Acessado em: 03 fev. 2015.
- BRASIL 2006. Diretrizes Metodológicas para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, 3a Edição.
- CARDOSO D., RIEDEL P.S., VEDOVELLO R., BROLLO M.J., TOMINAGA L.K. 2009. Compartimentação fisiográfica do município de Peruíbe, litoral de São Paulo - uma abordagem metodológica como subsídio à avaliação geotécnica de terrenos. *Pesquisas em Geociências*, v.36, n.3, p. 251-262.
- CENDRERO A., FRANCES E., DIÁZ DE TERAN J.R. 1992. Geoenvironmental units as a basis for the assessment, regulation and management of the Earth's surface. In: CENDRERO, A.; LÜTTIG, G.; WOLFF, F.C. (editors): *Planning the use of the Earth's surface*. New York: Springer Verlag.
- CENDRERO A., FRANCES A., DEL CORRAL D. 2004. Environmental quality indices: a tool for assessing and monitoring geoenvironmental map units. In: PEJON, O.; ZUQUETTE, L. (eds.): *Cartografia Geotécnica e Geoambiental - Conhecimento do Meio Físico: Base para a Sustentabilidade*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 5, São Carlos, Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. p. 525 -564.
- CERRI L.E.S. 1993. Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para a prevenção de acidentes. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP.
- CERRI L.E.S., MACEDO E.S., OGURA A.T., NUNES C.M., CARNEIRO S.R., MODESTO R.P. 1990. Plano preventivo de defesa Civil para a minimização das consequências de escorregamentos em municípios da Baixada Santista e Litoral Norte do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 1, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1: 396-408.
- DRM (Departamento de Recursos Naturais) 2015. Correlação chuvas x escorregamentos no Estado do Rio de Janeiro no mês de março de 2015. Relatório Técnico. Disponível em: <http://www.drm.rj.gov.br/index.php/downloads/category/45-correlao-chuvas-x-escorregamentos-nade>. Acessado em: 29 jun 2015.
- EMPLASA 2010a. Arquivos digitais das ortofotos do Projeto de Atualização Cartográfica do Estado de São Paulo - "Projeto Mapeia São Paulo. Produtos de levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011. Titularidade: Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A - EEMPLASA. Contrato de Licença de Uso 038/12, estabelecido entre EEMPLASA e SMA.

EMPLASA 2010b. Arquivos digitais do modelo digital de superfície do Projeto de Atualização Cartográfica do Estado de São Paulo - "Projeto Mapeia São Paulo". Produtos de levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011. Titularidade: Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A - EMLASA. Contrato de Licença de Uso 038/12, estabelecido entre EMLASA e SMA.

FERNANDES-DA-SILVA P.C. & CRIPPS J.C. 2011. Geo-environmental Terrain Assessments Based on Remote Sensing Tools: A Review of Applications to Hazard Mapping and Control. In: BRONIEWICZ, E. (Ed.): Environmental Management in Practice. Rijeka: InTech. Disponível em: <http://cdn.intechopen.com/pdfs/16284/InTechGeo_environmental_terrain_assessments_based_on_remote_sensing_tools_a_review_of_applications_to_hazard_mapping_and_control.pdf>. Acessado em: 19 nov. 2012.

FERNANDES-DA-SILVA P.C., VEDOVELLO R., FERREIRA C.J., BROLLO M.J., FERNANDES A.J., CRIPPS J.C. 2010. Geo-environmental mapping using physiographic analysis: constraints on the evaluation of land instability and groundwater pollution hazards in the Metropolitan District of Campinas, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 61 (8): 1657-1675.

FERREIRA, C.J.; ROSSINI-PENTEADO. D. 2011. Mapeamento de risco a escorregamento e inundação por meio da abordagem quantitativa da paisagem em escala regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 11, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. CD-ROM. Disponível em: <https://docs.google.com/open?id=0B0J5AK7cID0aZTU3OTBiNDctZWZjMS00NTE5LTgyNDEtMjQwNDMxM2YzYjUy>. Acessado em: 16 nov. 2012.

FERREIRA C.J., ROSSINI-PENTEADO D., GUEDES A.C.M. 2013. O uso de sistemas de informações geográficas na análise e mapeamento de risco a eventos geodinâmicos. In: LOMBARDO, M.A. & FREITAS, M.I.C (org.): Riscos e Vulnerabilidades: Teoria e prática no contexto Luso-Brasileiro. Cultura Acadêmica- Editora UNESP, São Paulo, p. 155-188.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2013a. TerraMA2 - Monitoramento, Análise e Alerta. Manual do Usuário. Versão 3.0.2, setembro de 2013. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/terrama2/lib/exe/fetch.php?media=docs:manual:manual_usuario_terrama2_302.pdf. Acessado em: 01 jul. 2015.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2013b. TerraMA2 - Plataforma de Monitoramento, Análise e Alerta a extremos ambientais. Manual de Instalação. Versão 3.0.1, agosto de 2013. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/terrama2/lib/exe/fetch.php?media=docs:manual:manual_instalacao_terrama2_301.pdf Consultado em: 01jul2015.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2014. TerraMA2 - Monitoramento, Análise e Alerta. Dados dinâmicos disponíveis para usuários TerraMA2. Versão 3.0.2, fevereiro de 2014. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/terrama2/lib/exe/fetch.php?media=docs:manual:caracteristicas_dados_cptec.pdf Acessado em: 01 jul. 2015.

ISO (International Organization for Standardization). 2009. Iso 31.000:2009 - Risk management --Principles and guidelines. Genebra: International Organization for Standardization.

KAY J.N. & CHEN T. 1995. Rainfall-landslide relationship for Hong Kong. *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, v. 113, n. 2, p. 117-118, 1995.

LOPESE.S.S., NAMIKAWA L.M., REIS J.B.C. 2011. Risco de escorregamento: monitoramento e alerta de áreas urbanas nos municípios no entorno de Angra dos Reis - Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 11, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. CD-ROM.

LUCENA I.S. 1998. Projeto de Interfaces para Álgebra de Mapas em Geoprocessamento no Ambiente SPRING. Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada Espaciais - INPE, São José dos Campos.

- MACEDO E.S., OGURA A.T., SANTORO J. 1999. Defesa Civil e escorregamentos: o plano preventivo do litoral paulista. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA, 9, São Pedro. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.
- MENDES R.M. & VALERIO FILHO M. 2015. Real-Time Monitoring of Climatic and Geotechnical Variables during Landslides on the Slopes of Serra do Mar and Serra da Mantiqueira (São Paulo State, Brazil). *Engineering*, 7, 140-159. <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2015.73012>
- OLIVEIRA T.A., RIEDEL P.S., VEDOVELLO R., SOUZA C.R.G., BROLLO M.J. 2007. Utilização de técnicas de fotointerpretação na compartimentação fisiográfica do município de Cananéia, SP: apoio ao planejamento territorial e urbano. *Geociências (São Paulo)*, 26: 55-65.
- ONU. 2004. Living with Risk. A global review of disaster reduction initiatives - 2004 version. New York: United Nations, 2004. Disponível em: <http://www.unisdr.org/we/inform/publications/657>. Acessado em: 02 dez. 2012.
- PARIZZI, M.G.; SEBASTIÃO, C.S.; VIANA, C.S.; PFLUEGER, M.C.; CAMPOS, L.C.; CAJAZEIRO, J. M. D.; TOMICH, R.S.; GUIMARÃES, R.N.; ABREU, M.L.; SOBREIRA, F.G.; REIS, R. 2010. Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG. *Geografias (UFMG)*, 6(2): 49-68.
- REID M.E., LAHUSEN R.G., BAUM R.L., KEAN J.W., SCHULZ W.H., HIGHLAND L.M. 2012. Real-Time Monitoring of Landslides. U.S. Geological Survey, Fact Sheet 2012-3008, 4p. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3008/>. Acessado em: 01 fev. 2017.
- REMONDO J., BONACHEA J., CENDRERO A. 2008. Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences. *Geomorphology*, 94: 496 – 507.
- ROLIM G.S., CAMARGO M.B.P., LANIA D.G., MORAES J.F.L. 2007. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. *Bragantia, Campinas*, 66(4): 711-720.
- SÃO PAULO. 1997. Decreto Nº 42.565, de 1º de dezembro de 1997 - Redefine o Plano Preventivo de Defesa Civil - PPDC específico para Escorregamentos nas Encostas da Serra do Mar, e dá outras providências. *Diário Oficial do Estado, São Paulo, SP, Seção I*, 107(231): 1-2.
- SÃO PAULO. 2015. Meio Ambiente Paulista - Relatório de Qualidade Ambiental 2015. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo.
- SOARES E.P. 2006. Caracterização da precipitação na região de Angra dos Reis e a sua relação com a ocorrência de deslizamentos de encostas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 145p.
- SOARES E.P. & MARTON E. 2006. Relação entre precipitação e deslizamentos de encostas na região de Angra dos Reis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, Florianópolis. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia. Disponível em: <http://www.cbmet.com/cbm-files/14-521b8abc40054f93efb2e1a59761ffd.pdf>. Acessado em: 29 jun. 2015.
- TATIZANA C., OGURA A.T., CERRI L.E.S., ROCHA M.C.M. 1987a. Análise de Correlação entre Chuvas e Deslizamentos - Serra do Mar - Município de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA, 5, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2: 225-236.
- TATIZANA C., OGURA A.T., CERRI L.E.S., ROCHA M.C.M. 1987b. Modelamento Numérico da Análise de Correlação entre Chuvas e Deslizamentos aplicados à Encosta da Serra do Mar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA, 5, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2: 237-248.
- TOMINAGA L.K., FERREIRA C.J., VEDOVELLO R., TAVARES R., SANTORO J., SOUZA C.R.

de G. 2004. Cartas de perigo a escorregamentos e de risco a pessoas e bens do Litoral Norte de São Paulo: conceitos e técnicas. In: PEJON, O.; ZUQUETTE, L. (eds.): SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 5, São Carlos. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. p. 205-216. CD-ROM.

VARNES D. J. 1984. Landslides hazard zonation: a review of principles and practice. Paris: Unesco. 63Pp, 1984. Disponível em: <http://www.bib.ub.edu/fileadmin/fdocs/landslidehazard.pdf>. Acessado em: 24 de agosto de 2012.

VEDOVELLO R. 2000. Zoneamentos geotécnicos aplicados à gestão ambiental, a partir de Unidades Básicas de Compartimentação - UBCs. Tese de Doutorado. IGCE, UNESP, Rio Claro. 154p.

VILA D. A., SCOFIELD R. A., KULIGOWSKI R. J., DAVENPORT J. C.; Satellite rainfall estimation over South America: Evaluation of two major events. NOAA Technical Reports n. 114, US Department of Commerce, Washington, D.C, June 2003.