



Estágio de Pós-Doutorado



Elias Ribeiro de Arruda Junior  
[eliasarrudajr@yahoo.com.br](mailto:eliasarrudajr@yahoo.com.br)

# Calibração de modelos de escorregamento utilizando a plataforma para monitoramento, análise e alerta a extremos ambientais (TerraMA<sup>2</sup>) no município de Nova Friburgo-RJ

Supervisores:

Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo  
Eymar Silva Sampaio Lopes



São José dos Campos, 05 de setembro de 2014

# Introdução

---

**Movimentos de massa** – fenômenos naturais da dinâmica externa – agente na evolução nas formas de relevo

**Corridas de massa** (*debris flows*) deflagradas pelos escorregamentos translacionais generalizados

**Ocupação humana** – áreas de **risco potencial**

**Desastres hidrológicos** (inundações e movimentos de massa)

No mundo (52,1% em 2011)

No Brasil (3ª posição no ranking mundial em nº mortes)

# Introdução

---

Ocorrência em paisagens montanhosas e com grande descargas hidráulicas no verão (Sudeste do Brasil)

Ultimamente uma série de eventos extremos, destaque para:

**2011** - Região Serrana do Estado do RJ (Friburgo)

900 vítimas fatais

35.000 desabrigados

**2013** - Região Serrana do Estado do RJ (Petrópolis)

**499 mm em 96h**

34 vítimas fatais

1500 desabrigados

# Introdução

---

A preparação para desastres naturais é um fator chave na redução do seu impacto;

Recentes iniciativas internacionais estão promovendo o desenvolvimento de uma cultura de prevenção de riscos e promoção de sistemas de alerta precoce;

Brasil, apesar de acordo internacional - até 2015 implantação de sistemas de alerta para reduzir o risco de desastres naturais, o sistema brasileiro revelou-se frágil...

# Introdução

---

Para o desenvolvimento do sistema de monitoramento da área de estudo foi utilizada a plataforma **TerraMA<sup>2</sup>**, da Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE),

Permite a construção de modelos ambientais com execução em tempo real...

# Objetivos

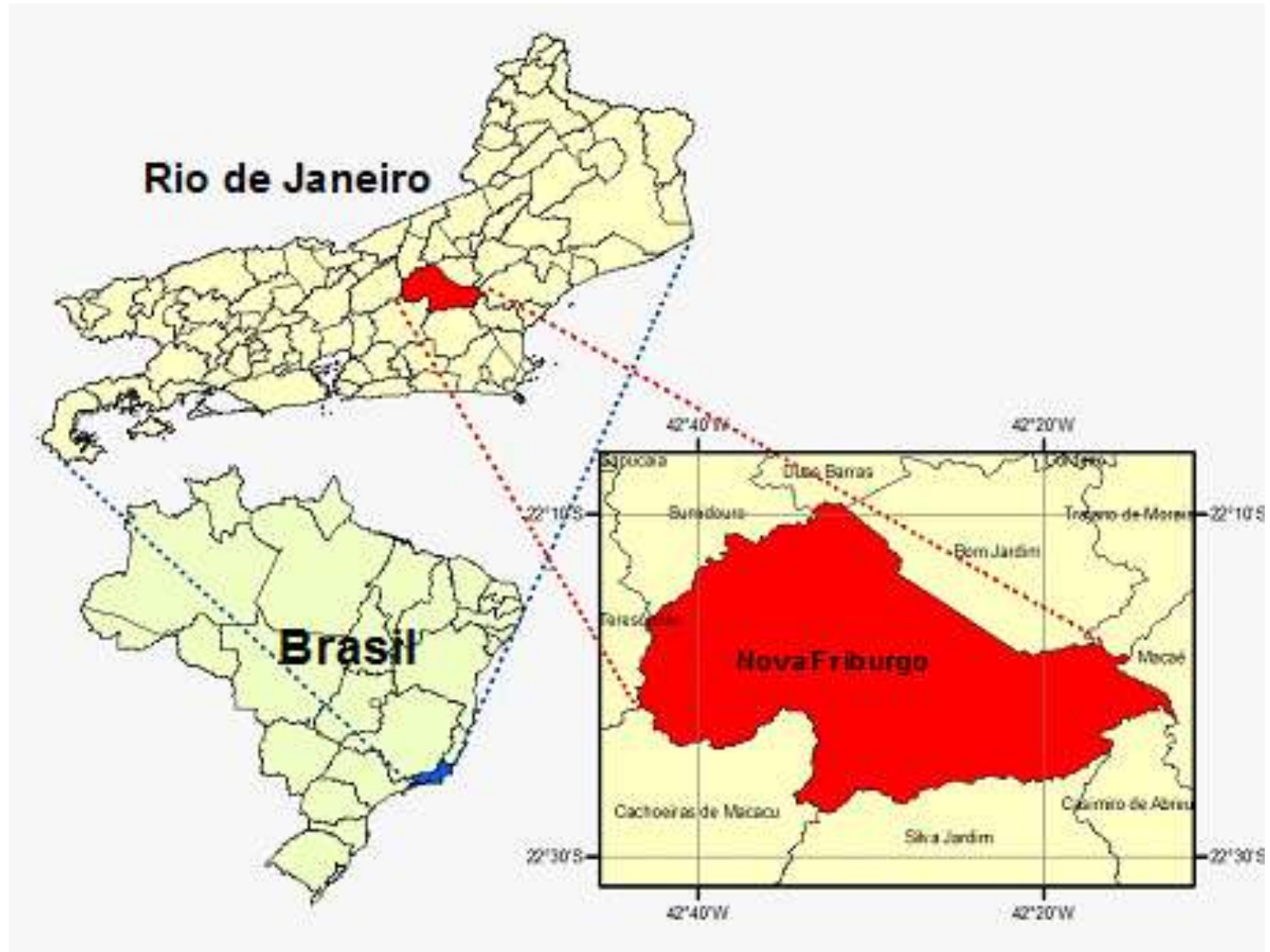
---

Implementar e calibrar os modelos matemático **SINMAP** e **SHALSTAB** para previsão de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais rasos na plataforma **TerraMA<sup>2</sup>**;

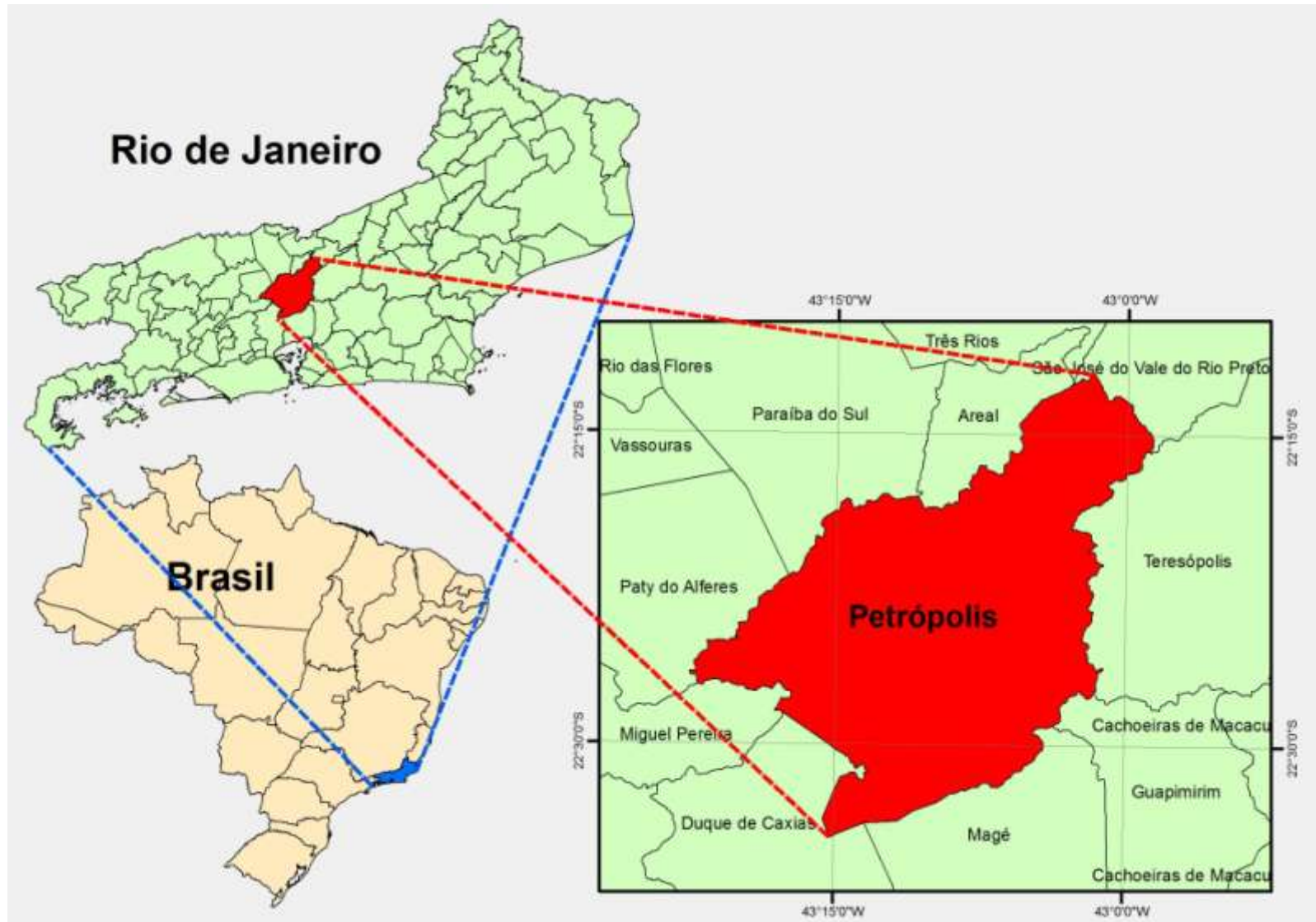
Adaptar aos modelos matemáticos, dados de chuva atualizados em tempo real advindos de várias fontes de dados;

Validar os dois modelos SINMAP e SHALSTAB com base em dados reais de **inventário de cicatrizes de escorregamentos** levantados no município de **Nova Friburgo-RJ** na **mega-catástrofe de janeiro de 2011**.

# Área de estudo

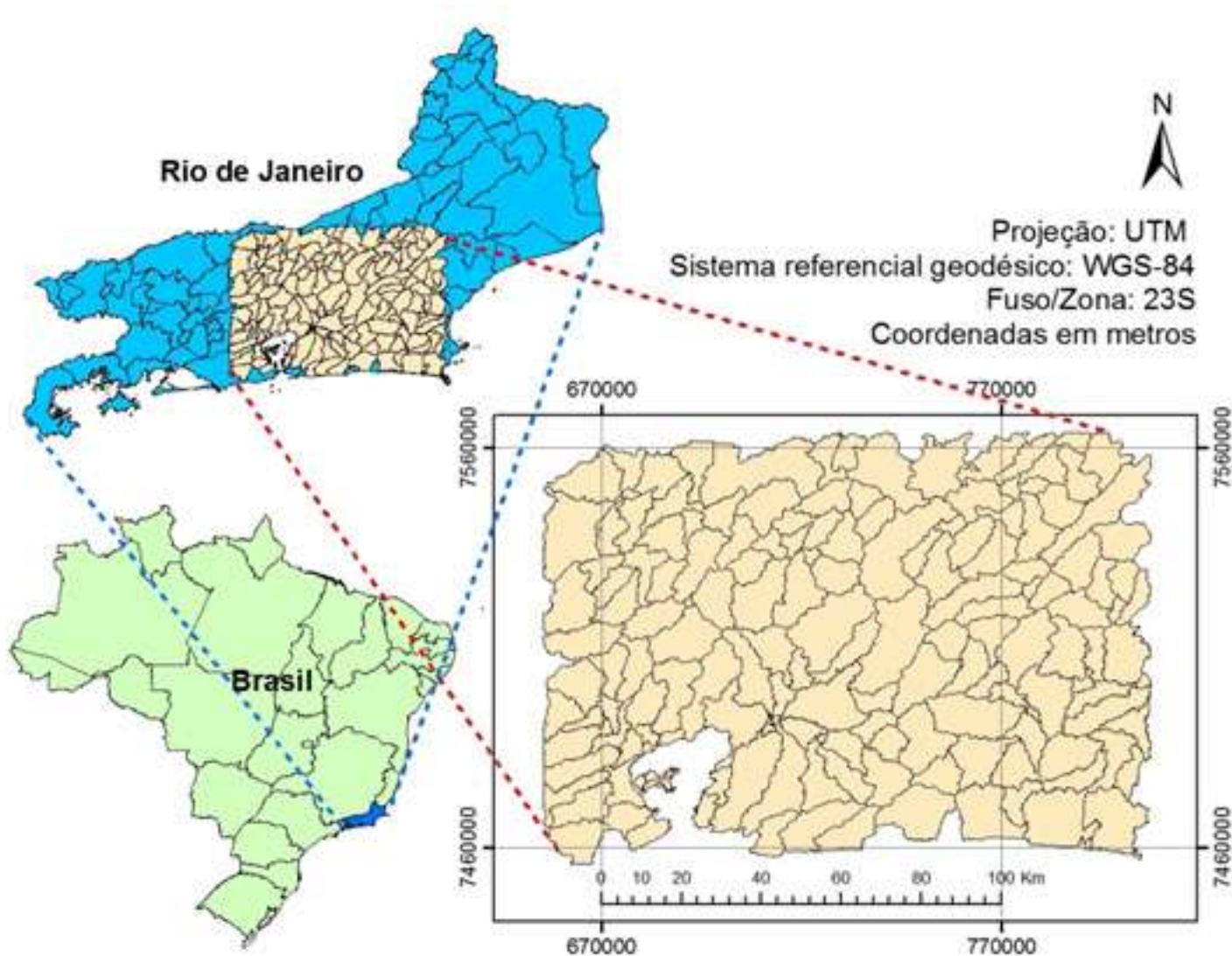


# Área de estudo





# Área de estudo



Sub-bacias compreendem as regiões: **Serrana, Metropolitana, Baixa da Litorânea e Centro-Sul Fluminense**

Sub-bacias em diferentes domínios geomorfológicos

# Material

Pesquisa desenvolvida nas instalações da



Ambientes usados:

TerraMA<sup>2</sup>, TerraView, Spring, TerraHidro, TerraPixel, GeoDMA



TerraView



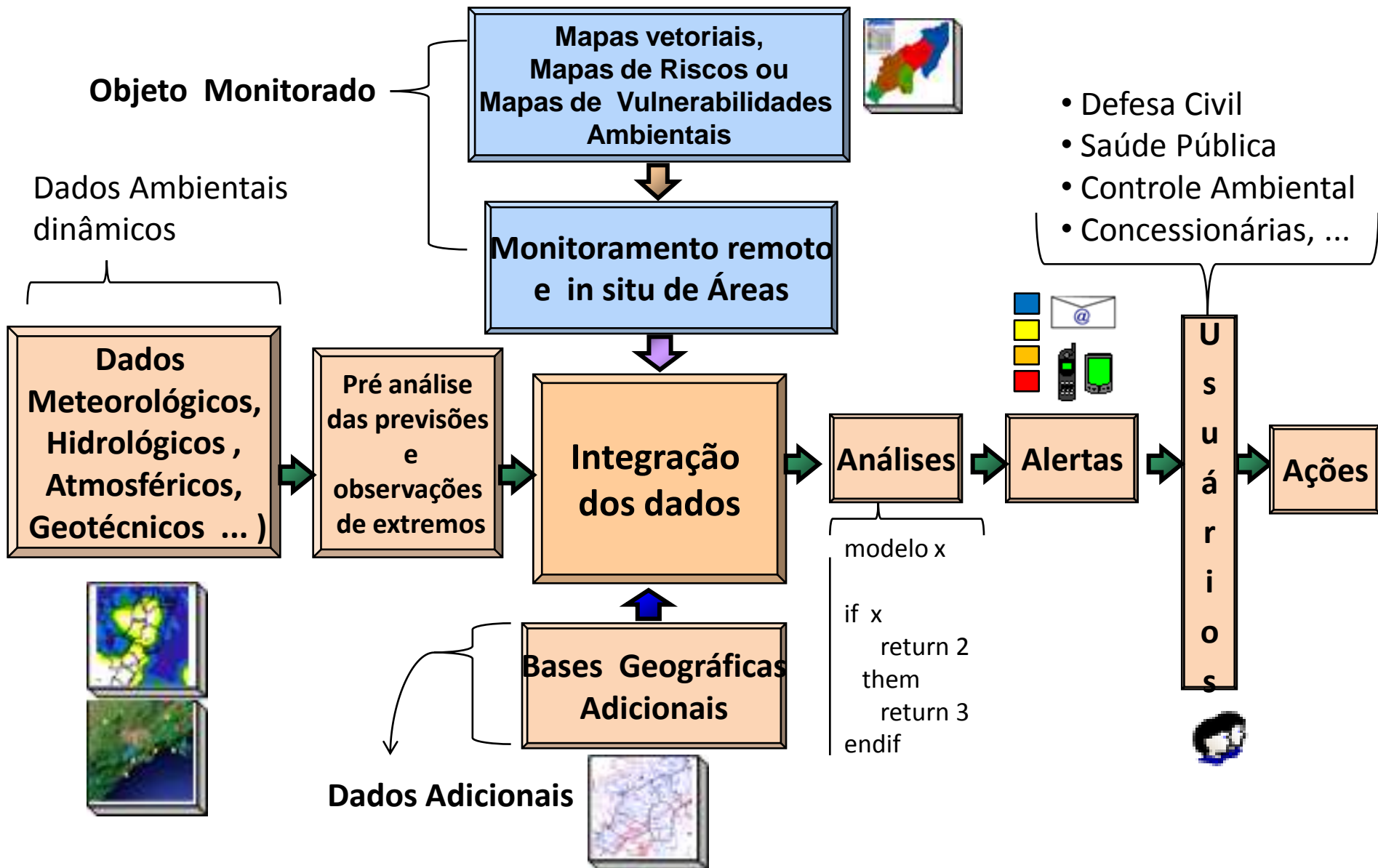
Desenvolvimento das aplicações nas linguagens:

**LEGAL** (*Spring*) – operadores zonais; e

**LUA** (*TerraMA<sup>2</sup>*) – desenvolvimento do modelo de alerta.



# Concepção da plataforma TerraMA2



# Material

---

## Comerciais:

ESRI ArcGIS 9.3

ESRI ArcView 3.2

ITT ENVI 4.8

## Extensões (grátis):

**SINMAP** - extensão para ArcGIS 9.x

**SHALSTAB** – extensão para ArcView 3.2

# Material

---

## Principais insumos

- Mapeamento topográfico do IBGE, vetores, 1:50.000
- MDE NASA/SRTM (TOPODATA/INPE), 30 x 30m

# Material

## Dados Ambientais

### Previsão

Estimativa de Precipitação Eta (Modelo de previsão numérica regional), 0 e 12h, 72 horas previstas (3 dias), 5 x 5 km;

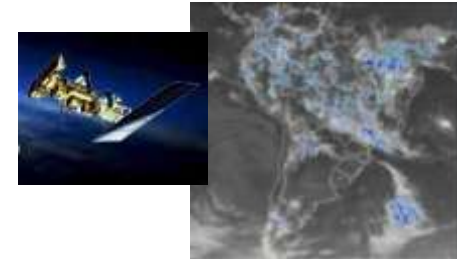


### Observação

Descargas elétricas (raios) da rede RINDAT-INPE, 15 min, 4 x 4 km;



Precipitação por satélite GOES (Hidroestimador do DSA-INPE), mm/h, banda do infra-vermelho, 15 min, 4 x 4 km;



Radar meteorológico Pico do Couto – RJ, grades com valores de reflectividade. 15 min, 1 x 1 km.





# Distribuição dos dados geoambientais



JPEG público - dados para usuários em geral sem capacidade de processamento

1130.4 +	1096.2 +	1077.9 +	1062.0 +	1041.7 +	1006.9 +	1000.0 +
1137.6 +	1129.5 +	1113.1 +	1097.7 +	1065.1 +	1035.0 +	1012.5 +
1158.2 +	1156.1 +	1124.9 +	1096.7 +	1054.4 +	1030.1 +	1000.0 +
1158.4 +	1141.7 +	1127.4 +	1105.6 +	1073.2 +	1048.5 +	1030.9 +
1124.0 +	1117.1 +	1120.0 +	1096.2 +	1067.7 +	1061.2 +	1044.4 +
1087.7 +	1100.7 +	1094.4 +	1079.6 +	1044.8 +	1037.1 +	1027.1 +
1078.7 +	1071.9 +	1058.8 +	1027.2 +	1000.0 +	1000.0 +	1000.0 +

Grade numérica disponível para FTP ou na forma de serviços WEB. Dados para usuários TerraMA2 com capacidade de processamento

# Aquisição, integração e pré-processamento dos dados

---

- Dados – maioria da internet (grátis)
- Integração de dados georreferenciados no *TerraView*
  - Compatibilização propriedades cartográficas
- Pré-processamento dos dados



# Aquisição, integração e pré-processamento dos dados

TerraView 4.2.2 - [Tela de Visualização]

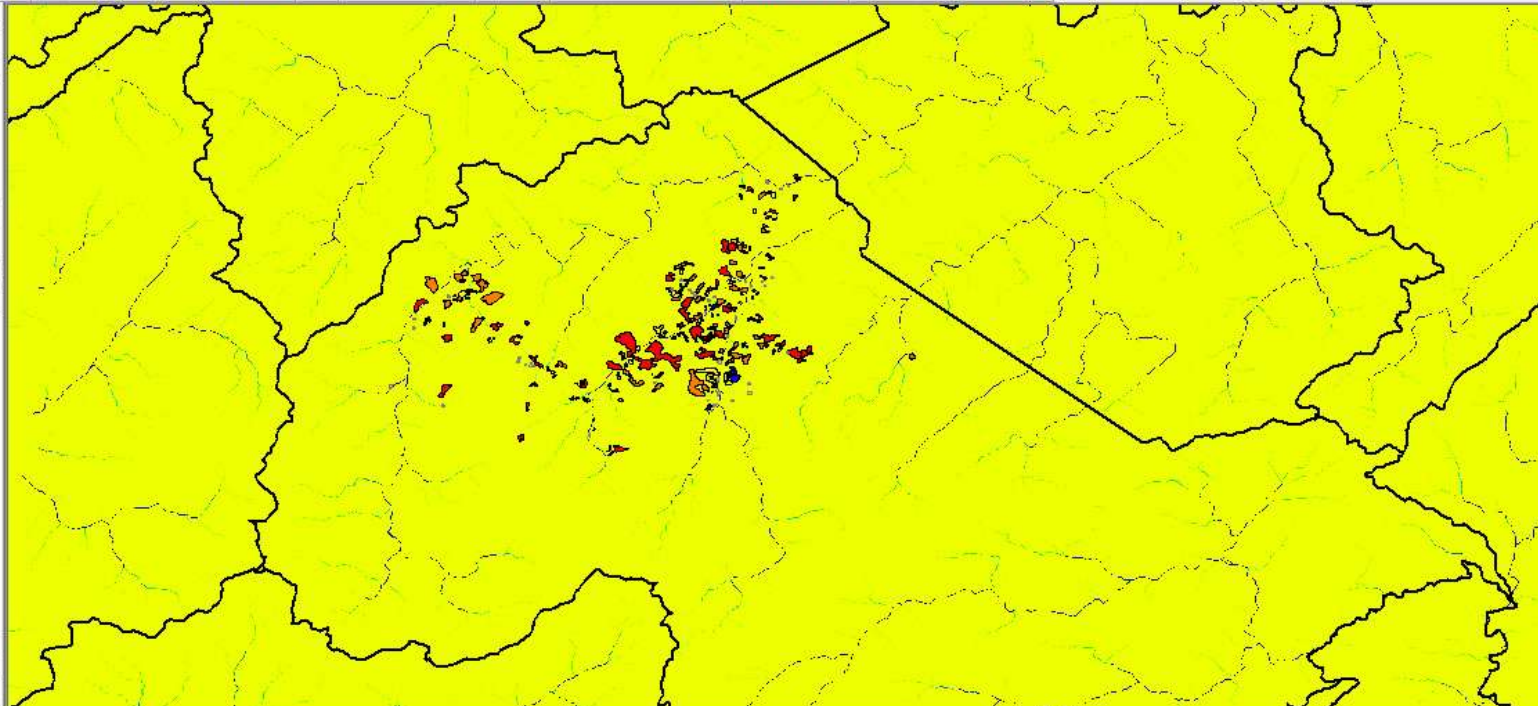
Arquivo Exibir Plano Vista Tema Análise Operação Plugins Ajuda

Bancos de Dados

- frb\_est\_2014\_07\_31
  - hidro\_2011\_6\_20110101120000
  - hidro\_2011\_6\_20110102120000
  - hidro\_2011\_6\_20110103120000
  - hidro\_2011\_6\_20110104120000
  - hidro\_2011\_6\_20110105120000
  - hidro\_2011\_6\_20110106120000

Vistas/Temas

- Chuna\_2011
- Chuva\_2013
- rio
  - UF\_2500g
  - Municipios\_RJ
  - SRTM\_s\_latlong\_sad69
  - Areas\_shastab (warnings)
  - Risco (warnings)
  - Risco\_SINMAP (warnings)
  - Risco\_Shalstab (warnings)
  - SRTM\_a\_latlong\_sad69
  - Setor\_CPRM\_pol
  - PLEN\_1\_hidro\_diario\_1\_201
  - SRTM\_s\_latlong\_sad69\_1



	sprarea	sprperimet	sprotulo	spmome	id	object_id	data_src	data_unit	last_updated	operation	val	id_w	object_id_w	warning_level	id_c	object_id_c
1	88756	1192.6681	Setor_CPRM_pol115	Setor_CPRM_pol115	3067	Setor_CPRM_pol115	SI		2013-03-11 09:00:23	minvalue	0.486696	3067	Setor_CPRM_pol115	4		
2	54596.25	1463.0873	Setor_CPRM_pol116	Setor_CPRM_pol116	3068	Setor_CPRM_pol116	SI		2013-03-11 09:00:23	minvalue	0.9004726	3068	Setor_CPRM_pol116	3		
3	38883.875	936.0333	Setor_CPRM_pol117	Setor_CPRM_pol117	3069	Setor_CPRM_pol117	SI		2013-03-11 09:00:23	minvalue	0.9538682	3069	Setor_CPRM_pol117	3		
4	40800.875	884.1397	Setor_CPRM_pol118	Setor_CPRM_pol118	3070	Setor_CPRM_pol118	SI		2013-03-11 09:00:23	minvalue	0.8153084	3070	Setor_CPRM_pol118	3		

Number of Rows: 254, Pointed: 0, Queried: 0, Pointed and Queried: 0

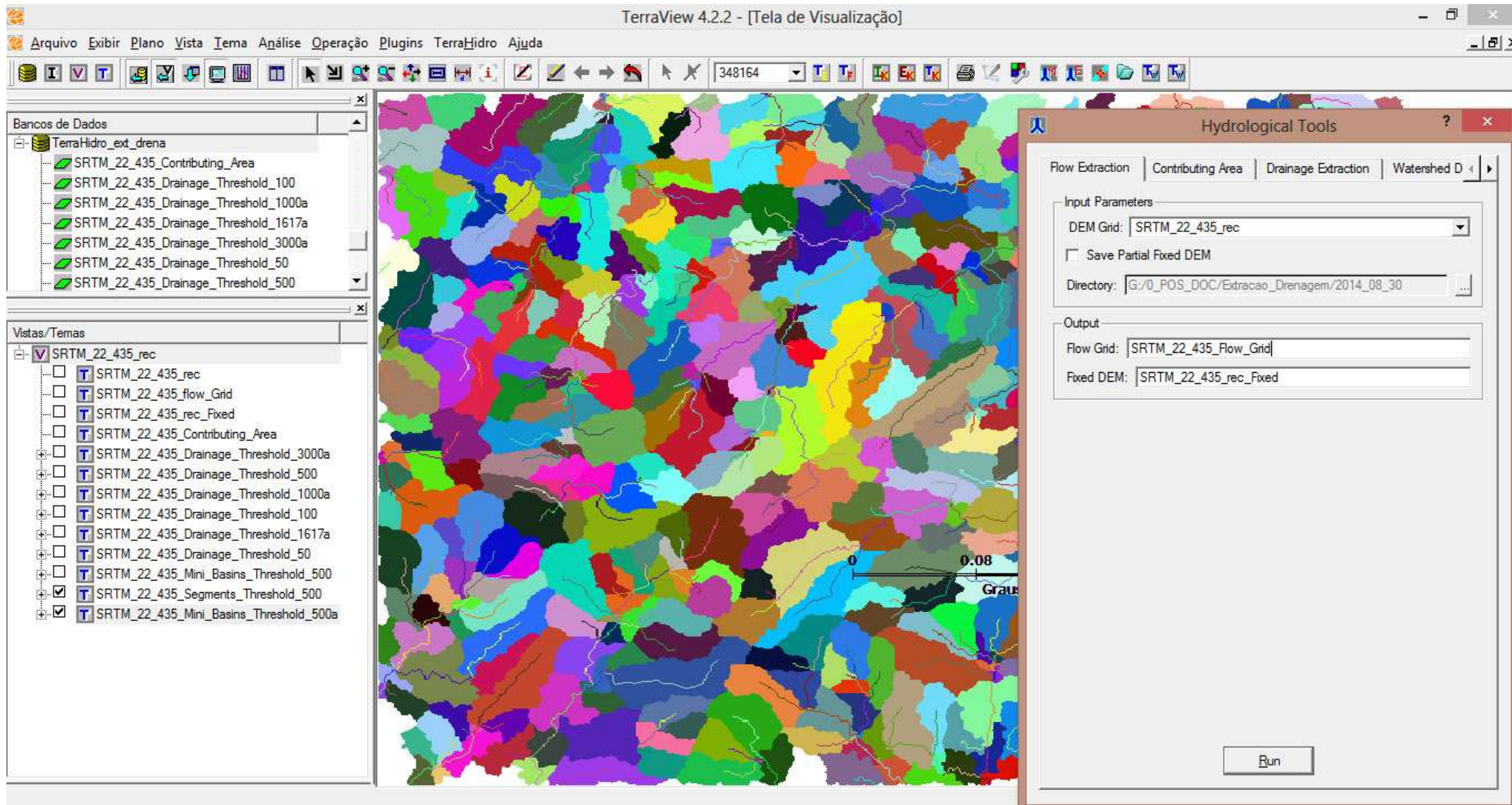
Tela do *TerraView* com base de dados georreferenciados

# Extração da rede de drenagem e delimitação das sub-bacias hidrográficas

---

- **Insumo:** MDE SRTM/TOPODATA
- **Software:** TerraHidro - *Plugin* de TerraView
  - Ajustes MDE (eliminação depressão)
  - Direção de fluxo (8 vizinhos)
  - Cálculo de fluxo local e fluxo acumulado
  - Delimitação da drenagem
    - **fluxo acumulado > limiar** (*Threshold* = 500)
  - Delimitação das sub-bacias hidrográficas
    - utilizando **direção de fluxo** e **rede de drenagem**

# Extração da rede de drenagem e delimitação das sub-bacias hidrográficas

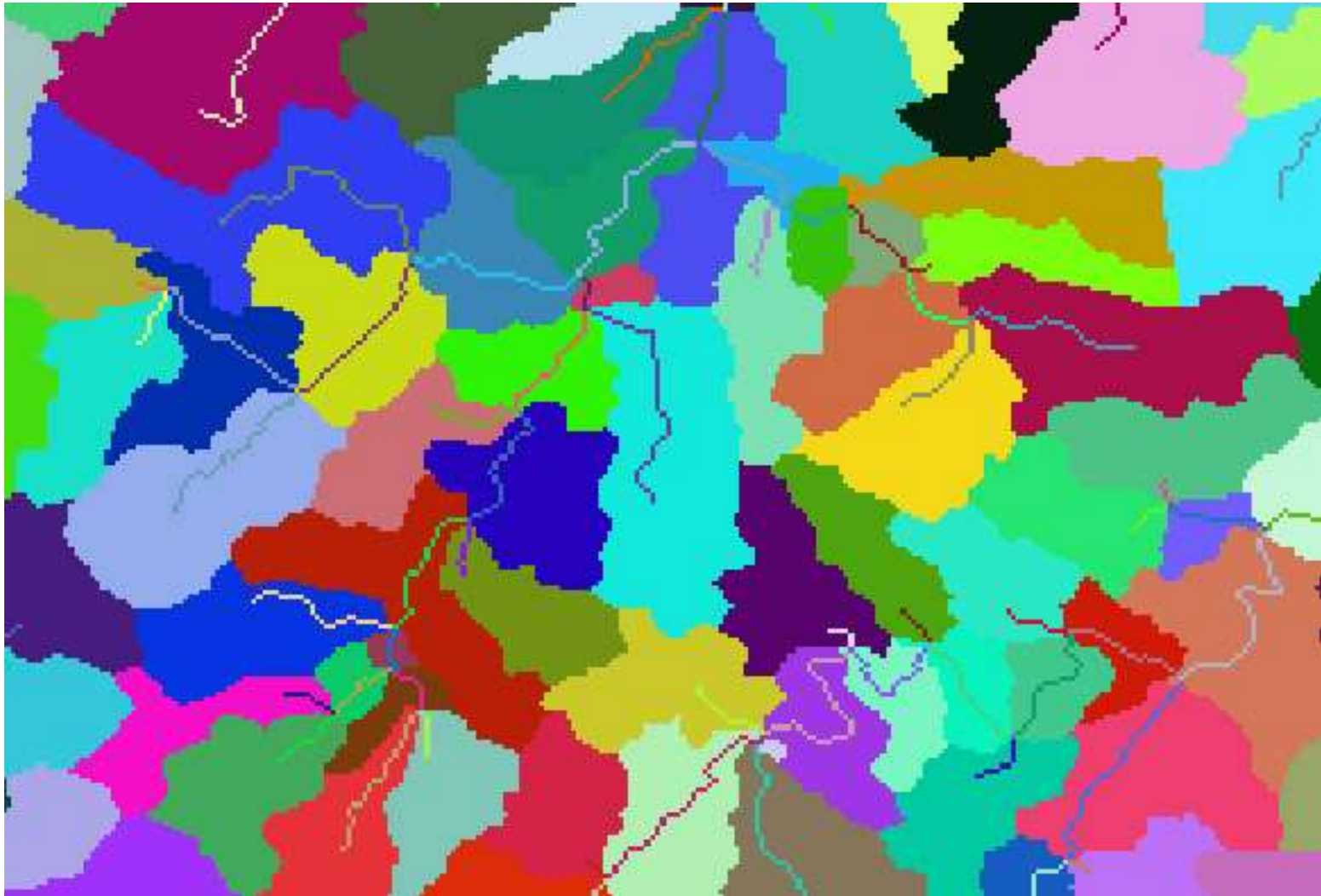


Tela do *TerraHidro* com extração drenagem e sub-bacias



# Extração da rede de drenagem e delimitação das sub-bacias hidrográficas

---



Tela do *TerraHidro* com detalhe drenagem e sub-bacias extraídas

# Extração de variáveis morfométricas do MDE

---

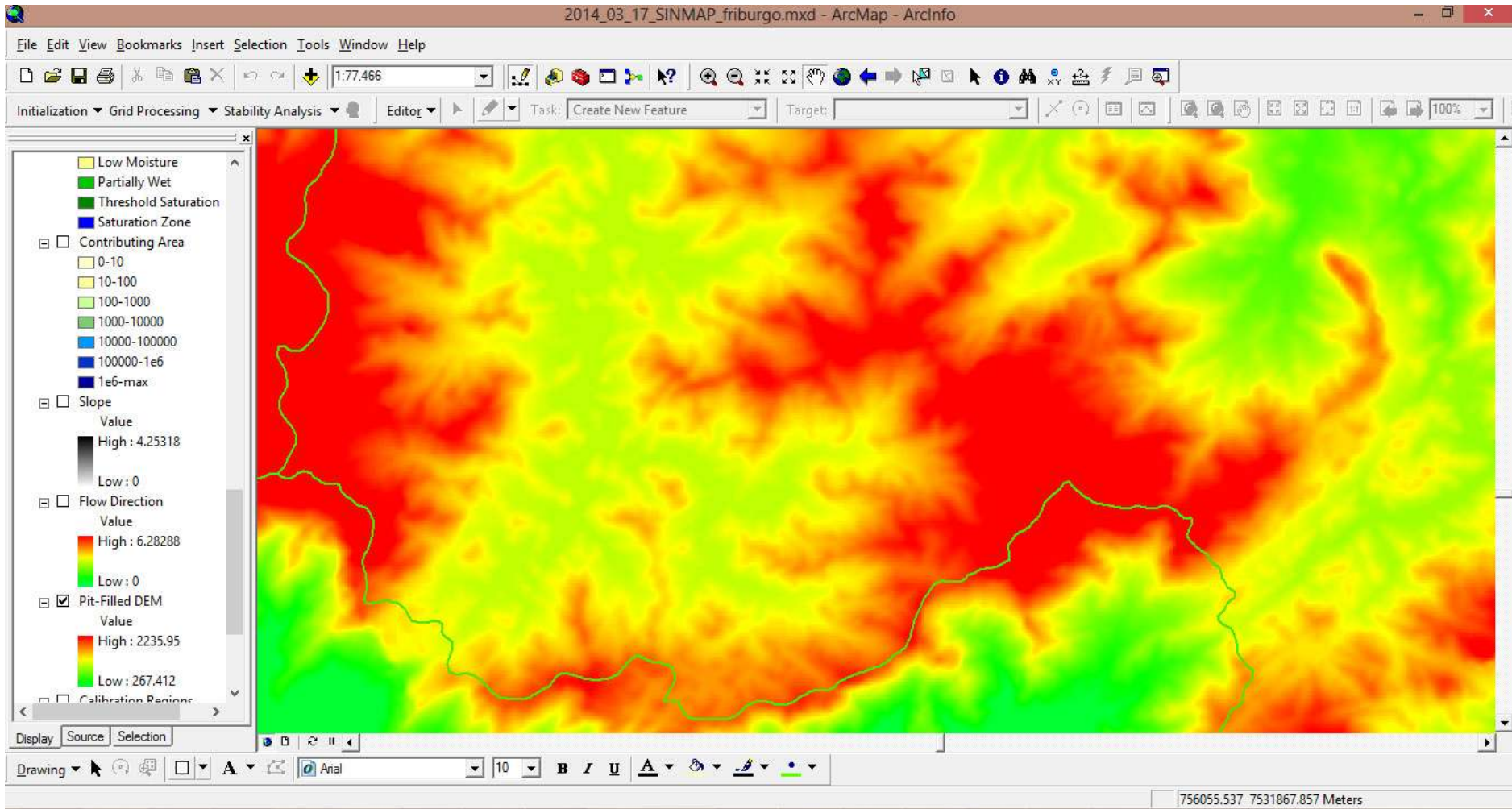
## Variáveis morfométricas

- Declividade
- Área de contribuição
- Direção de fluxo
- Orientação de vertentes
- Curvatura da encosta

## Sotwares para extração

- ESRI ArcGIS - extensão Spatial Analyst Tools
- TAUDEM
- SINMAP
- SHALSTAB
- TerraHidro

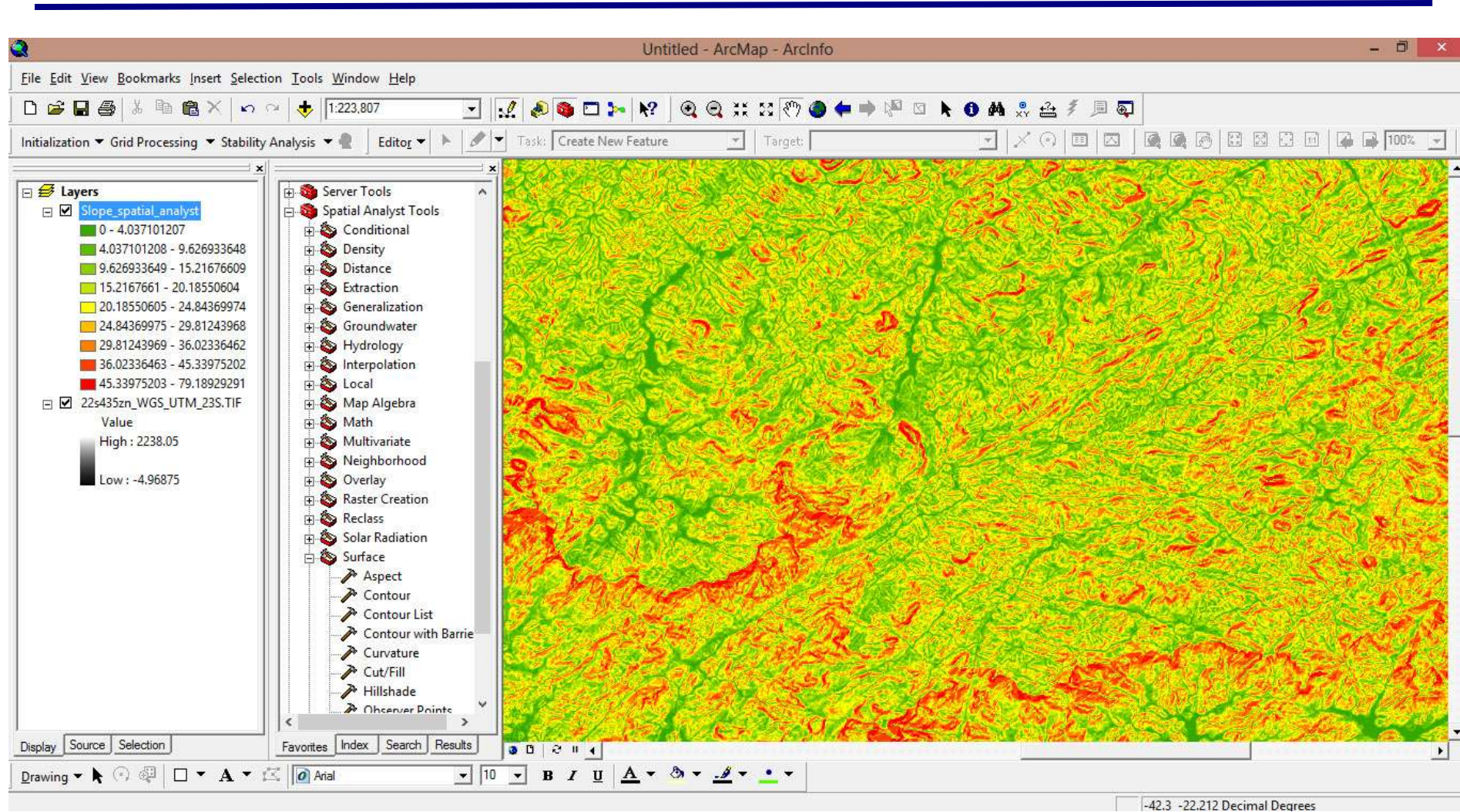
# Extração de variáveis morfométricas do MDE



MDE corrigido de depressões pelo SINMAP/ ArcGIS 9.3



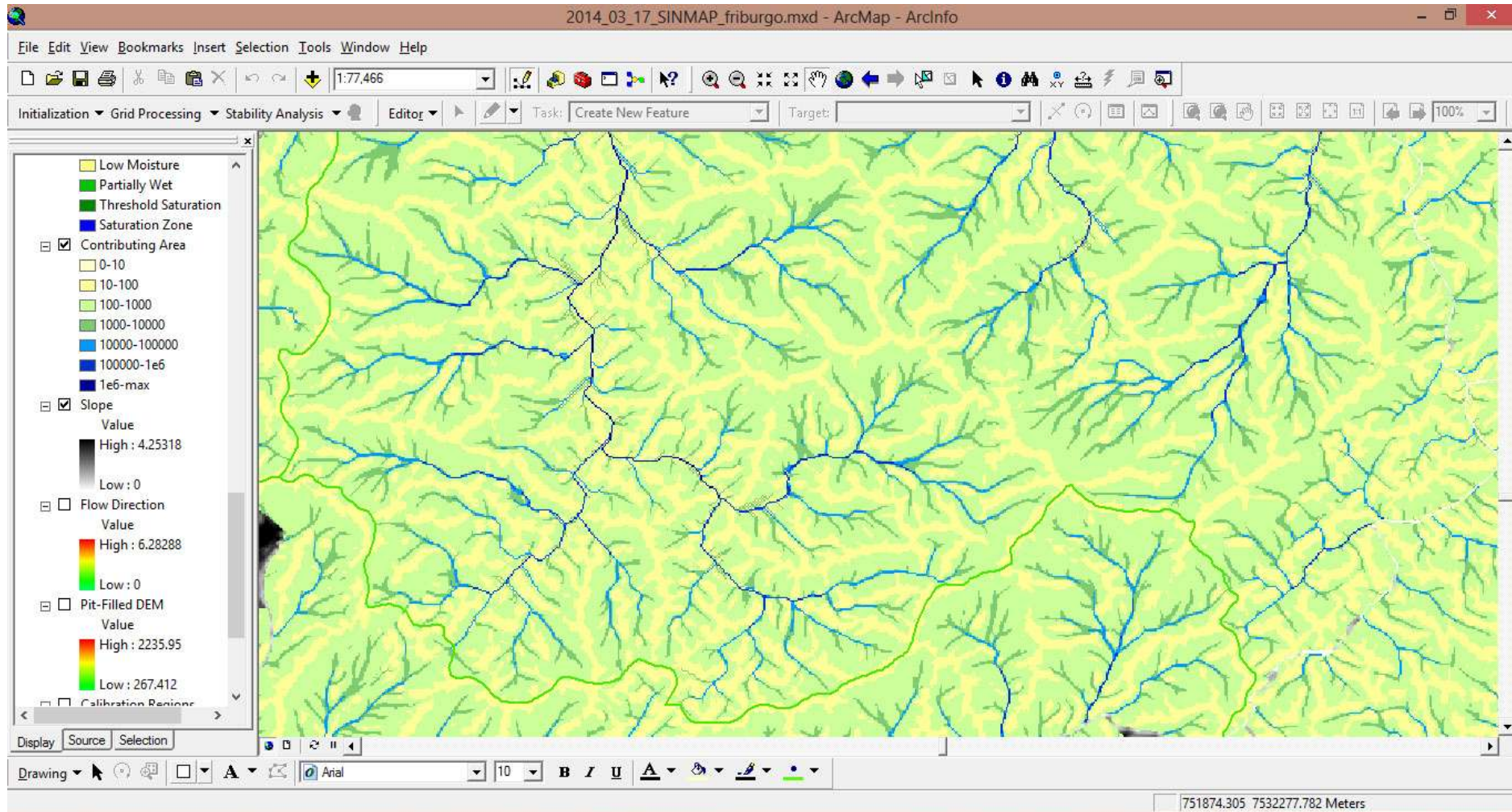
# Extração de variáveis morfométricas do MDE



Tela do ArcGIS - mapa de declividade (*slope*) extraído por ferramenta da extensão *Spatial Analyst Tools*.



# Extração de variáveis morfométricas do MDE



Área de contribuição (*Contributing Area*) extraído pela extensão SINMAP no ESRI ArcGIS 9.3



# Previsão de áreas de risco a escorregamentos

---

**Mapa de susceptibilidade** expressa a **probabilidade espacial e temporal de ocorrer um processo ou um fenômeno** com potencial de **causar danos**.

Quase todos os deslizamentos ocorridos no Brasil são do tipo **escorregamentos translacionais rasos**, deflagrados pela **redução da resistência ao cisalhamento dos solos superficiais**, em *médias e altas encostas*, sob *chuvas intensas*.

# Previsão de áreas de risco a escorregamentos

---

Várias formas na elaboração mapas de susceptibilidade:

- abordagens *qualitativas* e *quantitativas*;
- modelos *estocásticos* ou *determinísticos*;
- Quanto à relação entre variáveis esses modelos podem ser *empíricos* ou *baseados em processos físicos*.



Usam-se *equações diferenciais* do sistema físico, onde seus *parâmetros* podem ser estimados através de medidas reais.

# Previsão de áreas de risco a escorregamentos


O desencadeamento dos escorregamentos está ligado diretamente ao **conjunto de tensões** presentes nos **materiais das vertentes**:

Quando:

FS = 1, condição limite de estabilidade

FS < 1, próxima a instabilidade

FS > 1, estabilidade


$$FS = \frac{\sum \tau}{\sum T}$$

Onde:

FS = Fator de Segurança ou coeficiente de segurança

$\tau$  = forças de resistência ao cisalhamento

T = forças motoras (que impulsionam o deslizamento)

# Previsão de áreas de risco a escorregamentos

---

O **FS** é determinado a partir de

*modelo de estabilidade de encostas por talude infinito*  
(desenvolvido em 1773 por *Mohr-Coulomb*)

$$FS = \frac{c + \cos \beta [1 - wr] \tan \phi}{\sin \beta}$$



$$w = \text{Min} \left( \frac{Ra}{T \sin \beta}, 1 \right)$$

*modelo hidrológico de estado uniforme*

Carson & Kirkby (1972)

O'Loughlin (1986)

# Índice de estabilidade do SINMAP

---

**SINMAP** (*Stability Index MAPping*) é um modelo **estocástico** para mapeamento de índices de estabilidade em encostas.

É um pacote **gratuito** - *Universidade do Estado de Utah*  
(<http://hydrology.usu.edu/sinmap/>)

Pacote é executado em ambiente de SIG **ArcGIS** (v. 9.x)



# Índice de estabilidade do SINMAP

## Modelo matemático

Modelo SINMAP implementado na TerraMA<sup>2</sup>

$$FS = \frac{c + \cos \beta \left[ 1 - \text{Min} \left( \frac{R}{T} * \frac{a}{\text{sen} \beta}, 1 \right) * r \right] \tan \emptyset}{\text{sen} \beta}$$

Variável dinâmica



onde:

$c = (c_r + c_s) / (D \rho_s g)$  = coesão combinada adimensional  
relativa a espessura perpendicular do solo (D)

$a$  = área de contribuição (m<sup>2</sup>)

$r = \rho_w / \rho_s$  = razão entre a densidade da água e do solo

$\beta$  = inclinação do talude (graus);

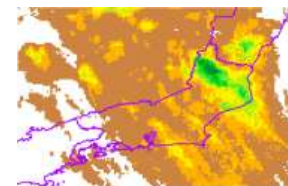
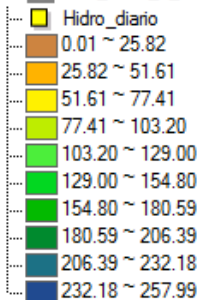
$R$  = recarga (m/hr)



$T$  = Transmissividade do solo (m<sup>2</sup>/hr)

$\emptyset$  = ângulo de atrito interno do solo

hidro\_2011\_6\_20110115120000



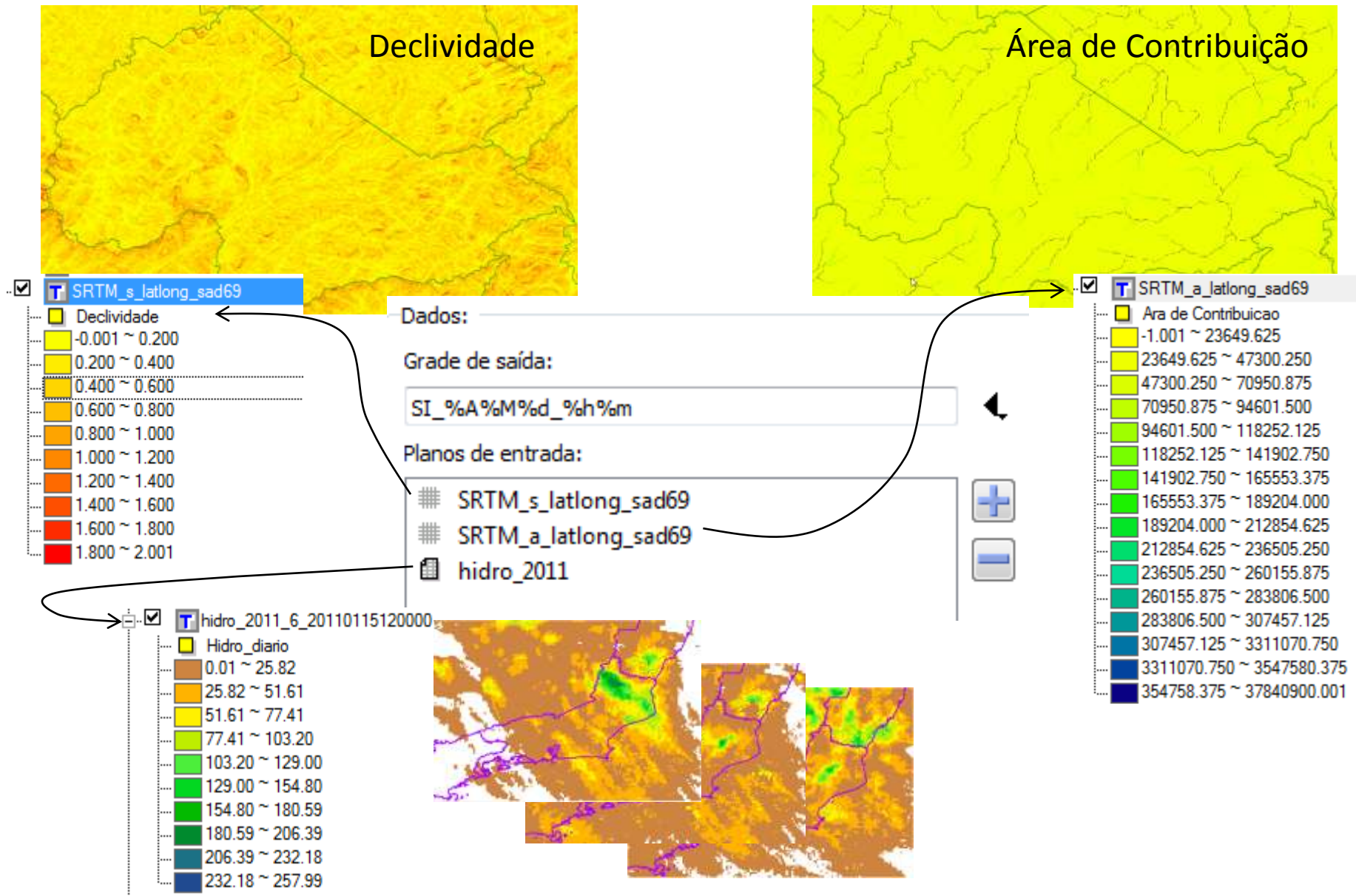
## Classes de estabilidade

SI - Índice de Estabilidade	Classe	Classes de Estabilidade	Intervalo dos Parâmetros	Possível influência de fatores não modelados
<b>SI &gt; 1,5</b>	1	Incondicionalmente Estável	Faixa não pode modelar instabilidade	São necessários fatores desestabilizantes significativos para gerar instabilidade
<b>1,5 &gt; SI &gt; 1,25</b>	2	Estabilidade moderada	Faixa não pode modelar instabilidade	São necessários fatores desestabilizantes moderados para gerar instabilidade
<b>1,25 &gt; SI &gt; 1,0</b>	3	Quase estável	Faixa não pode modelar instabilidade	São necessários fatores desestabilizantes mínimos para gerar instabilidade
<b>1,0 &gt; SI &gt; 0,5</b>	4	Limiar inferior de instabilidade	Metade do intervalo pessimista necessário para instabilidade	Fatores desestabilizantes não são necessários para gerar instabilidade
<b>0,5 &gt; SI &gt; 0,0</b>	5	Limiar superior de instabilidade	Metade do intervalo otimista necessário para estabilidade	Fatores estabilizantes podem gerar estabilidade
<b>0,0 &gt; SI</b>	6	Incondicionalmente Instável	Faixa não pode modelar estabilidade	Fatores estabilizadores são necessários para gerar estabilidade



# Índice de estabilidade do SINMAP

## Dados de entrada





# Índice de estabilidade do SINMAP

## Modelo escrito em LUA e grades de entrada

```

-- Parametros de entrada
local c1 = 0.02 -- Coesão mínima (adimensional)
local c2 = 0.28 -- Coesão máxima (adimensional)
local t1_entrada = 34 -- Ângula de atrito mínimo (graus)
local t2_entrada = 39 -- Ângula de atrito máximo (graus)

local rw = 1000 -- Densidade da água
local rs = 2300 -- Densidade do solo
local r = rw/rs -- Densidade da água/Densidade do solo (kg/m3)
local pi = 3.14159265358979

local t1 = t1_entrada*pi/180 -- Ângula de atrito mínimo (graus)
local t2 = t2_entrada*pi/180 -- Ângula de atrito máximo (graus)

local Tmin = 0.00004 -- Transmissividade mínima (valores arbitrados por nós)
local Tmax = 0.00005 -- Transmissividade máxima (valores arbitrados por nós)

local hidro_diario = amostra('hidro_2011') or 0
local x1_entrada = Tmin / (hidro_diario/1000.0) -- Razão Hidro/T mínima(em metros)
local x2_entrada = Tmax / (hidro_diario/1000.0) -- Razão Hidro/T máxima(em metros)
...
local x1 = 1/x2_entrada -- Razão R/T mínima vinda da literatura (em metros)
local x2 = 1/x1_entrada -- Razão R/T máxima vinda da literatura (em metro)

-- Dados de entrada estáticos (raster) (nossos)
local a = amostra('SRTM_a_latlong_sad69') or 0 -- Área de contribuição (m2)
local s = amostra('SRTM_s_latlong_sad69') or 0 -- Declividade (rad)

```

Dados:

Grade de saída:

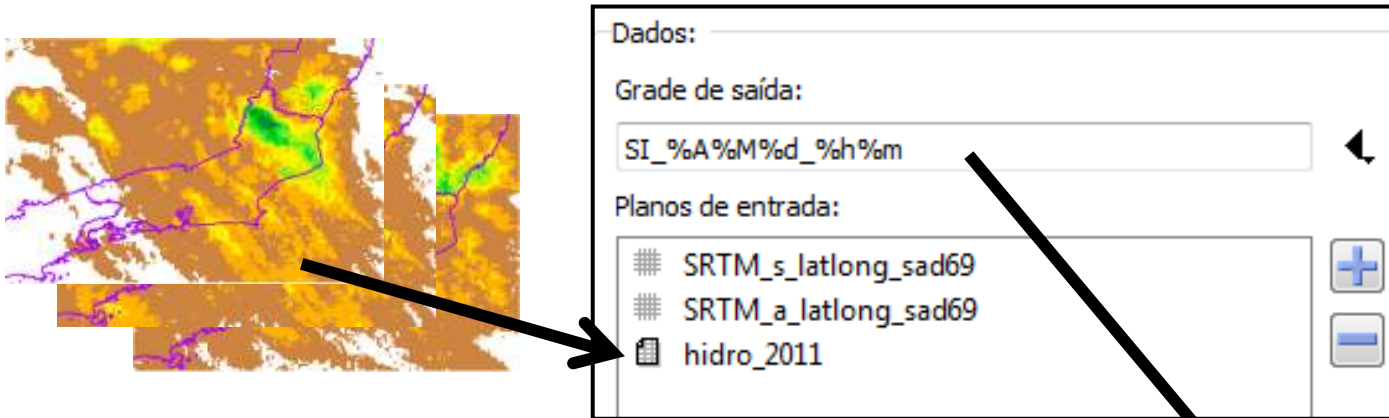
SI\_%A%M%d\_%h%m

Planos de entrada:

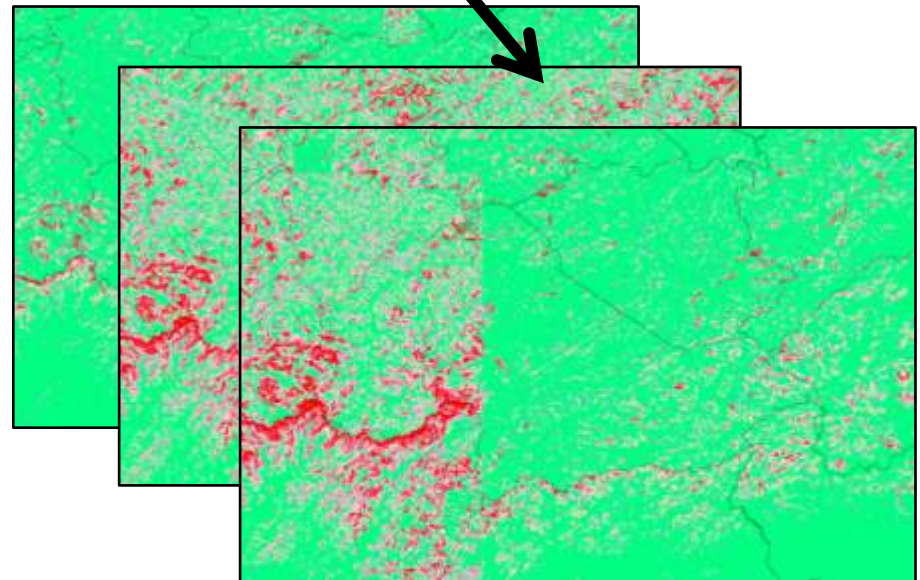
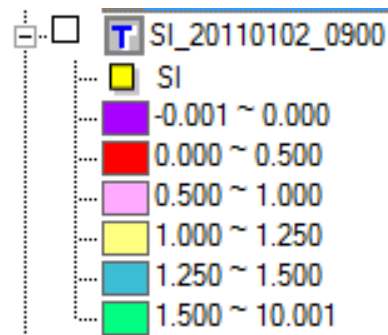
- ## SRTM\_s\_latlong\_sad69
- ## SRTM\_a\_latlong\_sad69
- 📄 hidro\_2011

# Índice de estabilidade do SINMAP

## Modelo escrito em LUA e grades de entrada e saída



Cada nova grade de precipitação uma nova grade do Índice de Estabilidade é criada...



# Índice de estabilidade do SINMAP

## Análise nas áreas de risco a partir da grade de SI

The image displays a GIS software interface for analyzing risk areas based on the SINMAP stability index. The interface is divided into several sections:

- Legend (Left):** Titled "SI\_20110102\_0900", it shows a color-coded scale for the SI index:
  - SI (Yellow)
  - 0.001 ~ 0.000 (Purple)
  - 0.000 ~ 0.500 (Red)
  - 0.500 ~ 1.000 (Pink)
  - 1.000 ~ 1.250 (Light Yellow)
  - 1.250 ~ 1.500 (Light Blue)
  - 1.500 ~ 10.001 (Green)
- Map (Top Center):** A map showing the geographical area being analyzed, with a black arrow pointing from the legend to it.
- Modelo de Análise (Right):** A code editor containing the following logic:
 

```

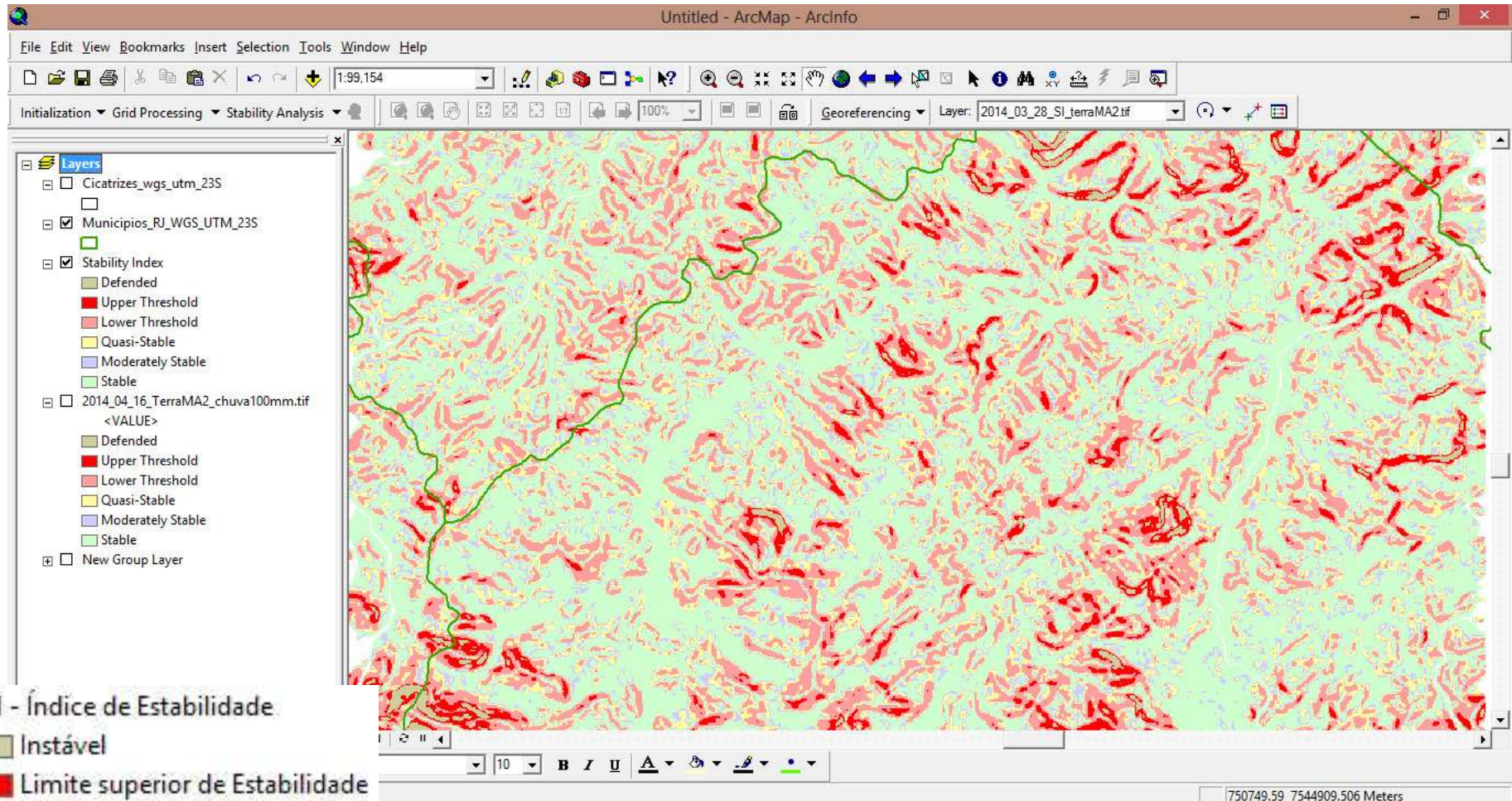
      local var1 = minimo('SI_SINMAP|')
      if var1 <= 0.5 then
        return 4 -- Alerta maximo
      elseif var1 <= 1 then
        return 3 -- Alerta
      elseif var1 <= 1.25 then
        return 2 -- Atencao
      elseif var1 <= 1.5 then
        return 1 -- Observacao
      else return 0 -- Normal
      
```
- Dados (Bottom Center):** A panel showing the data source:
  - Objeto Monitorado: Setor\_CPRM\_pol
  - Dados de entrada: SI\_SINMAP
- Legend (Bottom Right):** A color-coded legend for the risk levels:
  - 0 - Normal (Grey)
  - 1 - Observação (Blue)
  - 2 - Atenção (Yellow)
  - 3 - Alerta (Orange)
  - 4 - Alerta Máximo (Red)
- Final Map (Bottom Right):** A map showing the result of the analysis, with a black arrow pointing from the code editor to it. The map is color-coded according to the risk levels defined in the legend.

Cada nova grade do Índice de Estabilidade criada uma nova análise nas área de risco são calculadas...



# Índice de estabilidade do SINMAP

## Resultados

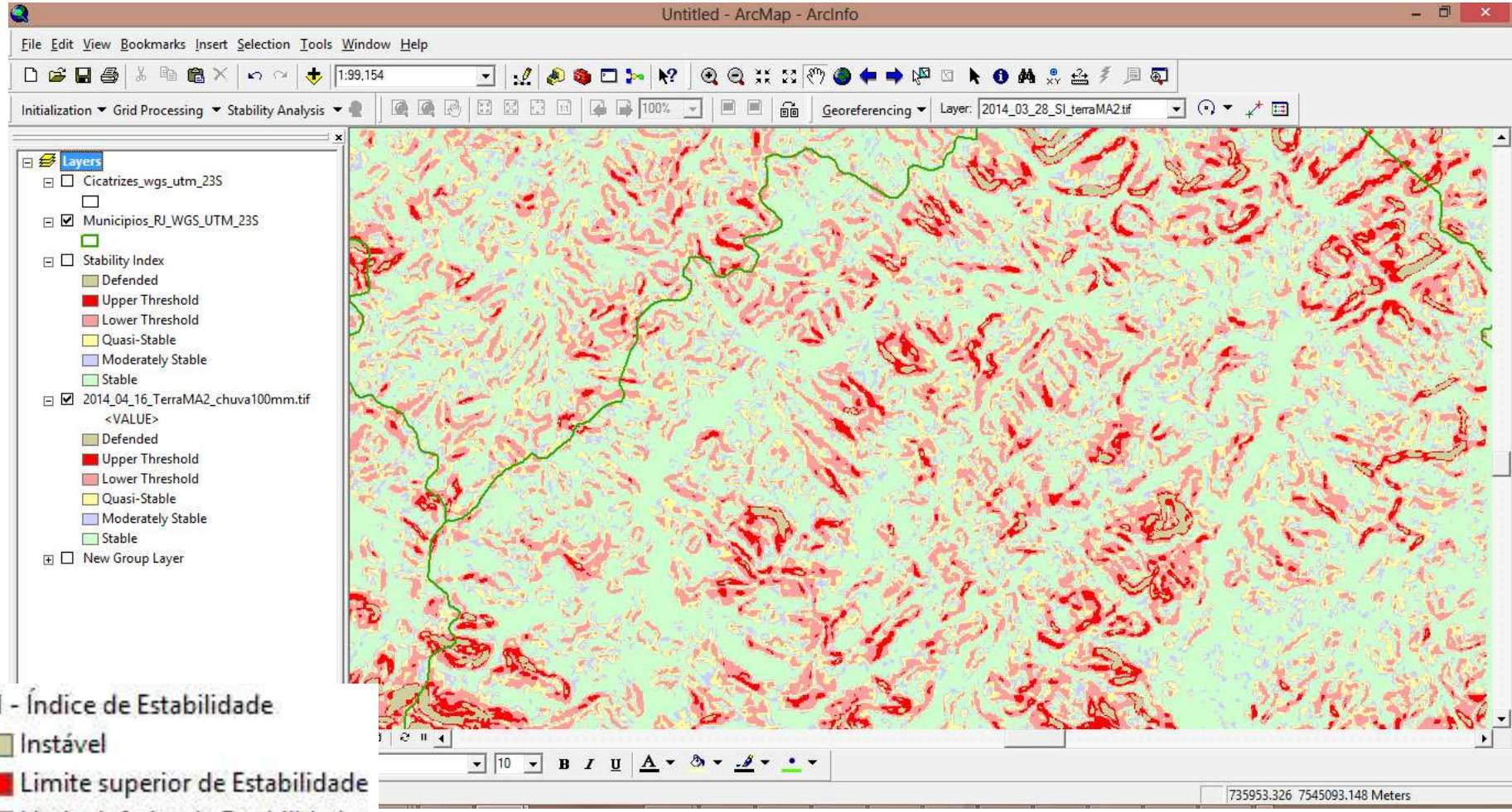


Mapa de SI calculado pelo SINMAP original  
(extensão para o ArcGIS)



# Índice de estabilidade do SINMAP

## Resultados

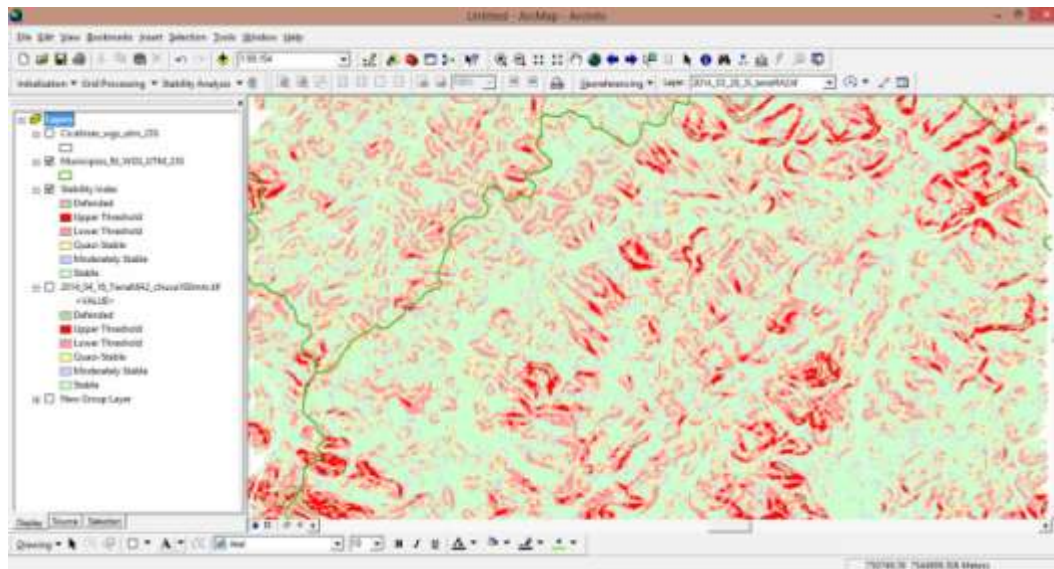


Mapa de SI calculado pelo SINMAP no TerraMA2



# Índice de estabilidade do SINMAP

## Resultados



Mapa de SI calculado pelo  
SINMAP original  
(extensão para o ArcGIS)

SI - Índice de Estabilidade

Instável

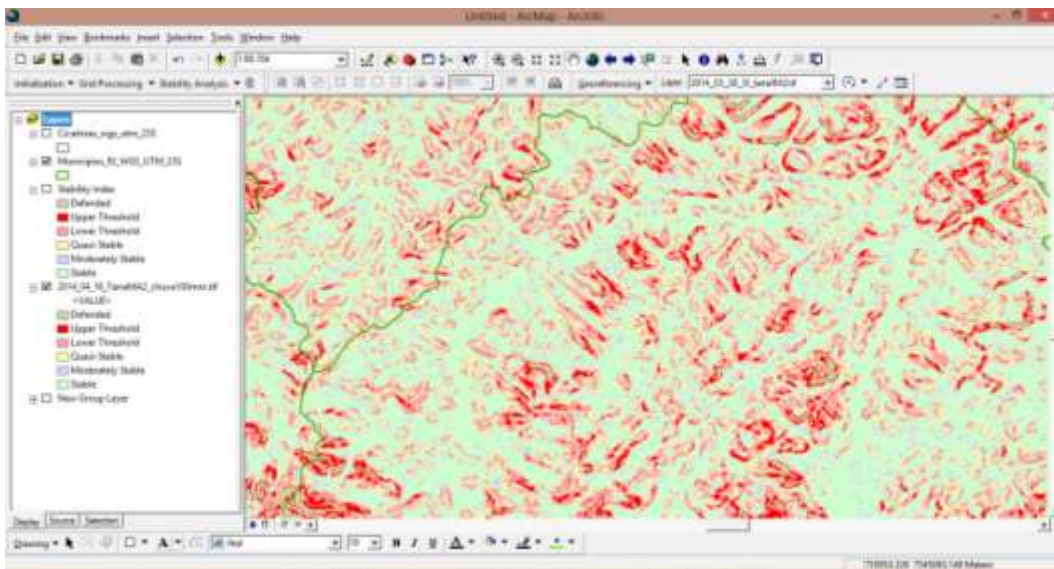
Limite superior de Estabilidade

Limite inferior de Estabilidade

Quase Estável

Moderadamente Estável

Estável

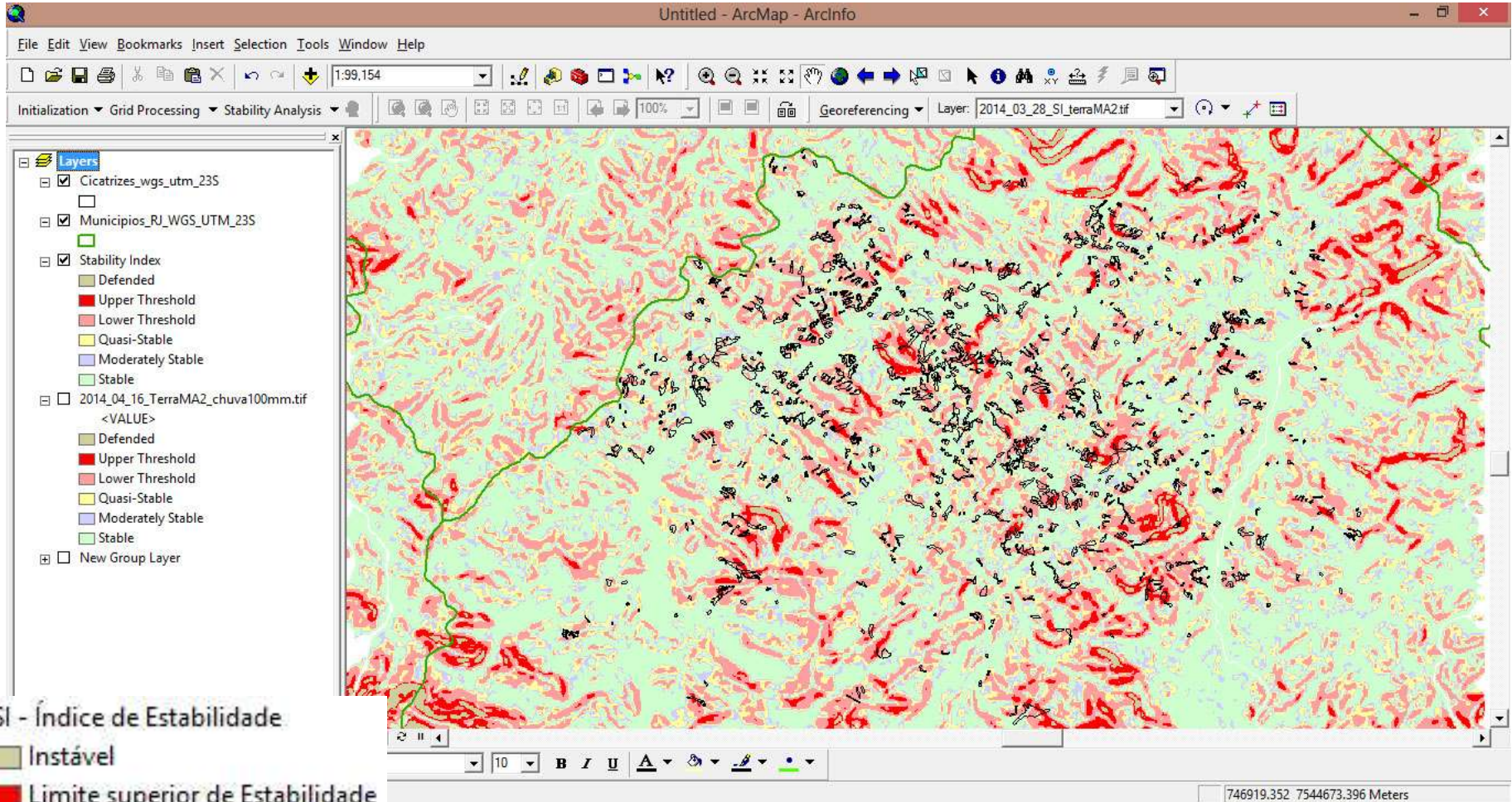


Mapa de SI calculado pelo  
SINMAP no TerraMA2



# Índice de estabilidade do SINMAP

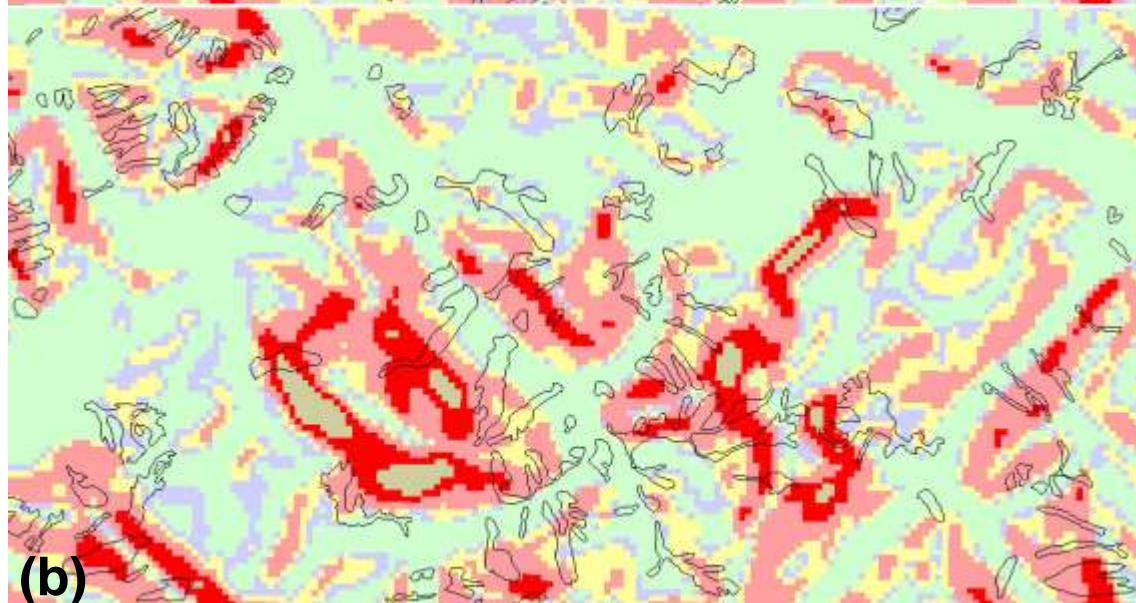
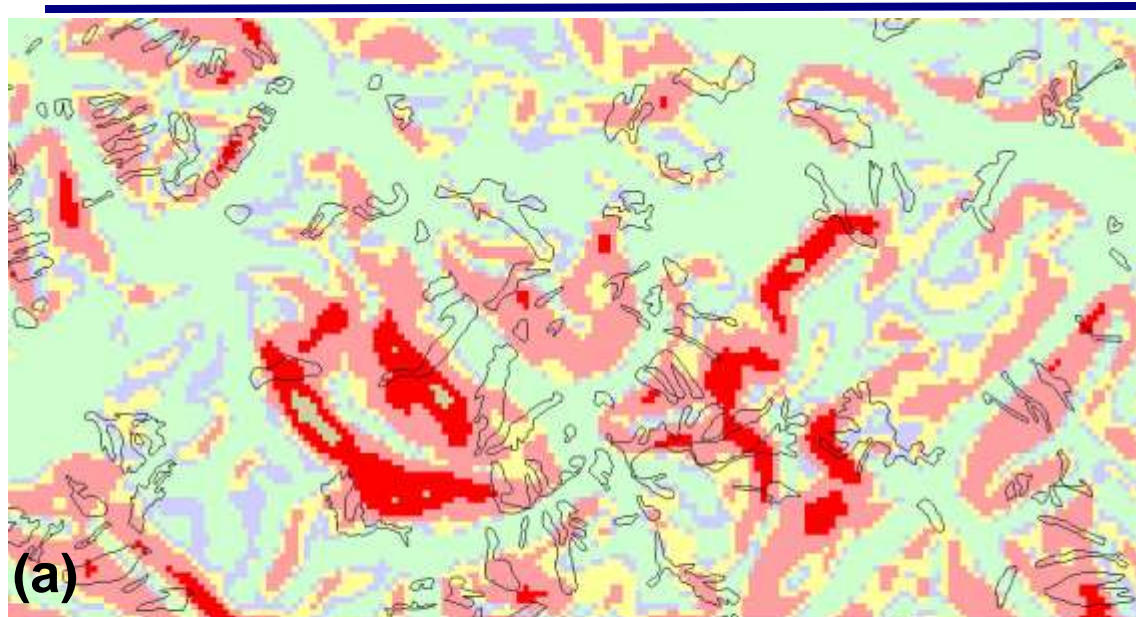
## Resultados



Mapa de SI calculado pelo SINMAP original  
(extensão para o ArcGIS)



## Resultados



SI - Índice de Estabilidade

Instável

Limite superior de Estabilidade

Limite inferior de Estabilidade

Quase Estável

Moderadamente Estável

Estável

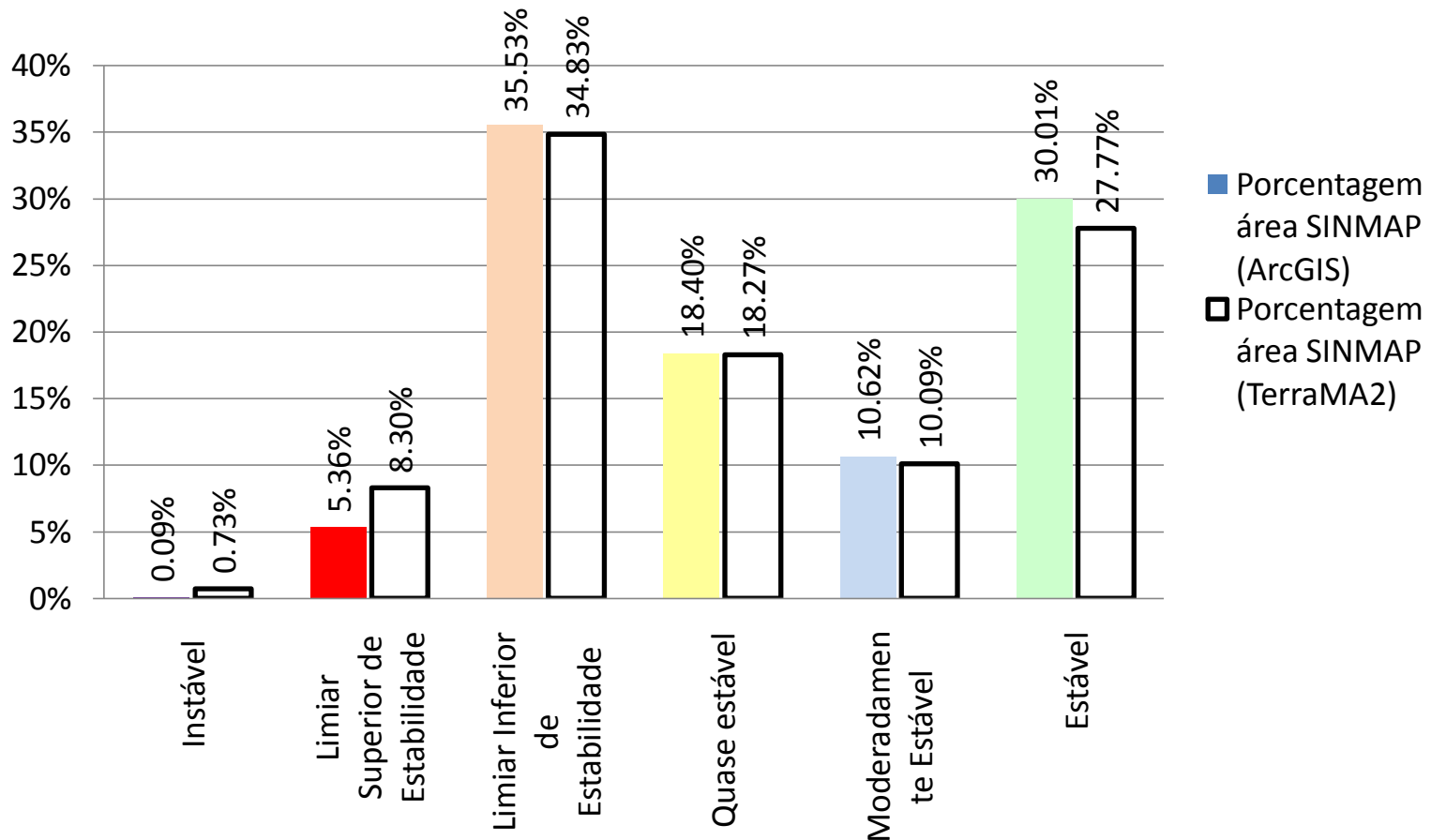
Detalhe de uma parte do mapa de SI gerado pelos dois programas, sobrepostos com as cicatrizes (em preto).

(a) SINMAP original e em  
(b) os SI do TerraMA2



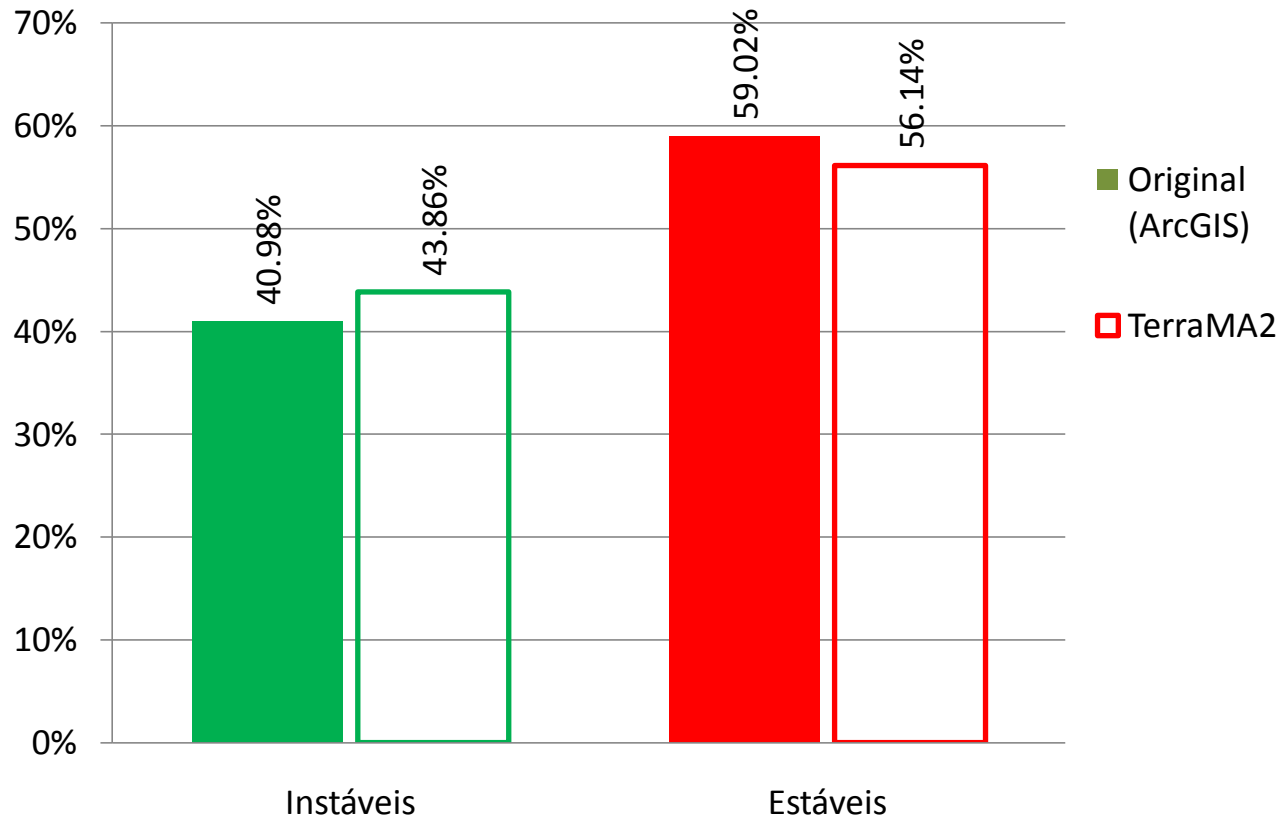
## Resultados

Gráfico 1 - Porcentagem de área das cicatrizes de escorregamentos de janeiro de 2011 em cada classe de estabilidade mapeada pelo modelo SINMAP, nas barras coloridas da implementação original (extensão do ArcGIS) e nas barras vazadas da implementação no TerraMA2.



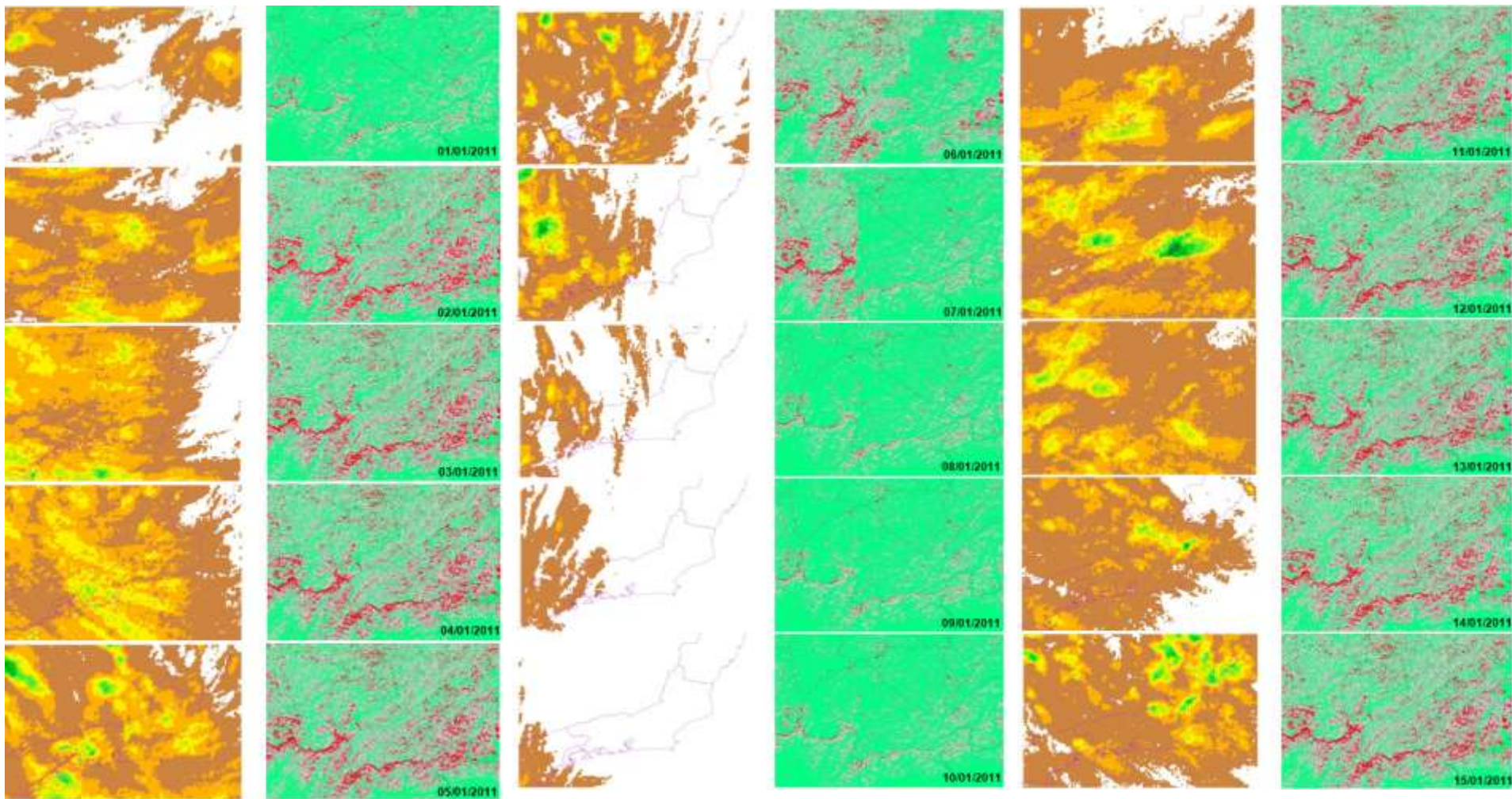
## Resultados

Gráfico 2 - Duas classes de estabilidade: Instáveis e Estáveis, a partir do agrupamento das seis classes de estabilidade do gráfico anterior.



# Índice de estabilidade do SINMAP

## Resultados

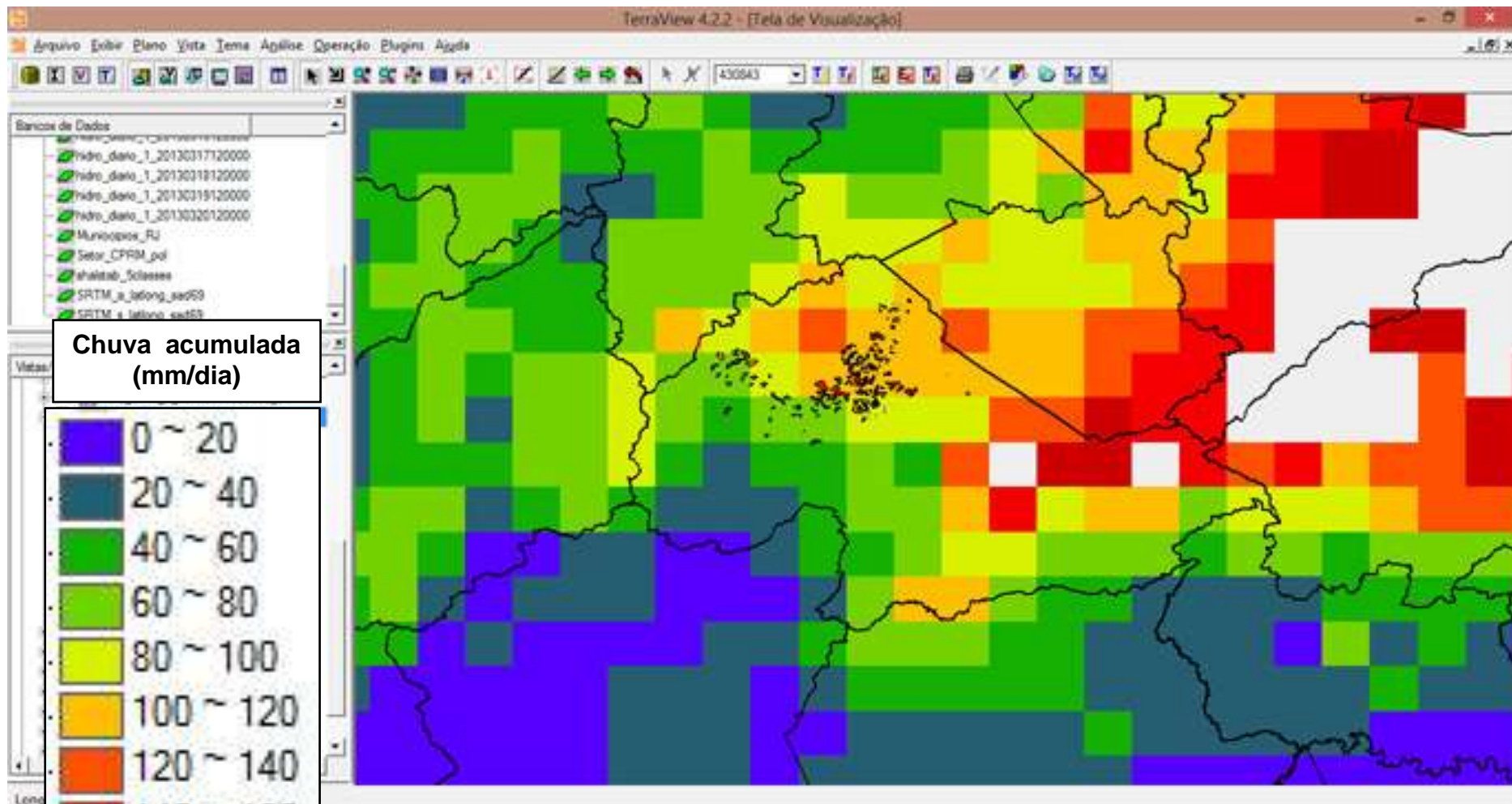


Comparativo entre dados de chuva do hidroestimador (DSA/INPE) à esquerda e mapas de SI gerados pelo SINMAP TerraMA2, a direita. Cada linha representa um dia, começando no dia 01/01/2011.



# Índice de estabilidade do SINMAP

## Resultados



Exemplo dos dados de chuva do hidroestimador sobreposto pelo mapa de municípios e o mapa de polígonos de risco.

## Resultados

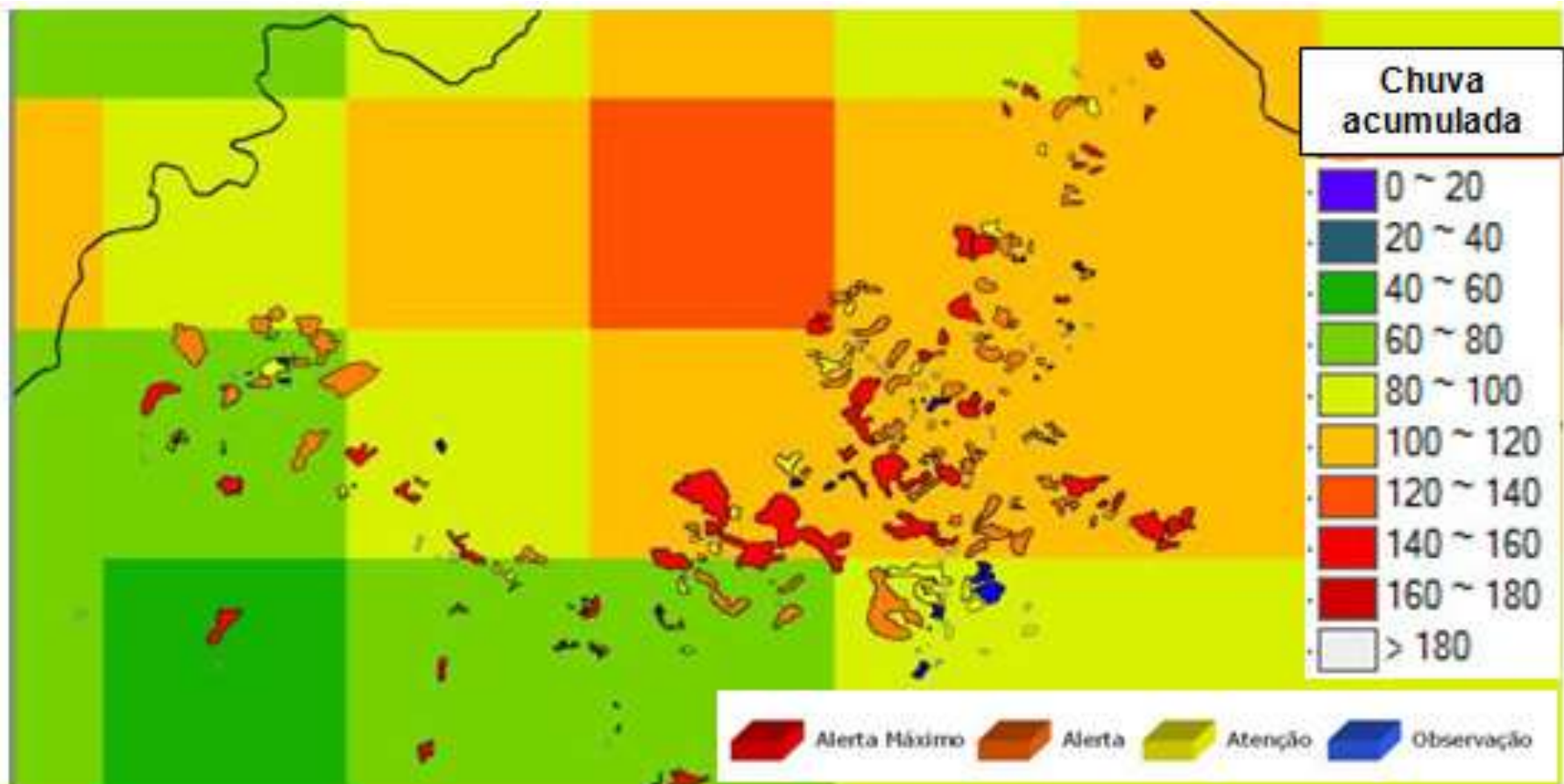
---

Níveis de alerta a partir dos intervalos dos valores calculados de SI

<b>Intervalo de SI</b>	<b>Valor</b>	<b>Nível de alerta</b>	<b>Cor</b>
SI $\leq$ 0.5	4	Alerta máximo	Red
0.5 < SI $\leq$ 1.0	3	Alerta	Orange
1.0 < SI $\leq$ 1.25	2	Atenção	Yellow
1.25 < SI $\leq$ 1.5	1	Observação	Blue
1.5 < SI	0	Normal	White



## Resultados



Polígonos de risco, devidamente coloridos com as cores dos respectivos níveis de alerta calculados pelo SINMAP, mostrados na legenda do canto inferior direito, sobrepostos aos dados de chuva do hidroestimador. A direita, a legenda dos intervalos dos dados de chuva.

# Índice de estabilidade do SHALSTAB

---

**SHALSTAB** (*Shallow Landsliding Stability Model*) é um modelo determinístico para mapeamento de índices de estabilidade em encostas.

É um pacote **gratuito** - *Universidade da California/Berkeley* (<http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/index.htm>)

Pacote é executado em ambiente de SIG **ArcView** (v. 3.2)



# Índice de estabilidade do SHALSTAB

## Modelo Matemático

Modelo SHALSTAB original no ArcView

$$\frac{a}{b} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$$

ou

$$\frac{Q}{T} = \frac{\text{sen}\theta}{(a/b)} \left[ \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \right]$$

Parâmetros topográficos

Razão hidrológica

onde:

a = área drenada a montante [m<sup>2</sup>]

b = elemento de contorno de comprimento [m]

Q = precipitação [m]

T = Transmissividade do solo [m<sup>2</sup>/dia]

$\rho_w$  = massa específica da água [Kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_s$  = massa específica do solo [Kg/m<sup>3</sup>]

g = aceleração da gravidade [constante 9,81m/s<sup>2</sup>]

c' = coesão efetiva [KN/m<sup>2</sup>]

z = profundidade do plano de ruptura [m]

$\theta$  = ângulo da vertente ou declividade [°]

$\phi$  = ângulo de atrito interno dos materiais [°]

# Índice de estabilidade do SHALSTAB

## Modelo Matemático

Modelo SHALSTAB implementado na TerraMA<sup>2</sup>

$$\frac{a}{b} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\emptyset} \right) T \text{ sen}\theta \quad \text{ou} \quad \frac{Q}{T} = \frac{\text{sen}\theta}{(a/b)} \left[ \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\emptyset} \right) \right]$$

Variável dinâmica

Variável dinâmica

onde:

$a$  = área drenada a montante [m<sup>2</sup>]

$b$  = elemento de contorno de comprimento [m]

$Q$  = precipitação [m]

$T$  = Transmissividade do solo [m<sup>2</sup>/dia]

$\rho_w$  = massa específica da água [Kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_s$  = massa específica do solo [Kg/m<sup>3</sup>]

$g$  = aceleração da gravidade [constante 9,81m/s<sup>2</sup>]

$c'$  = coesão efetiva [KN/m<sup>2</sup>]

$z$  = profundidade do plano de ruptura [m]

$\theta$  = ângulo da vertente ou declividade [°]

$\emptyset$  = ângulo de atrito interno dos materiais [°]

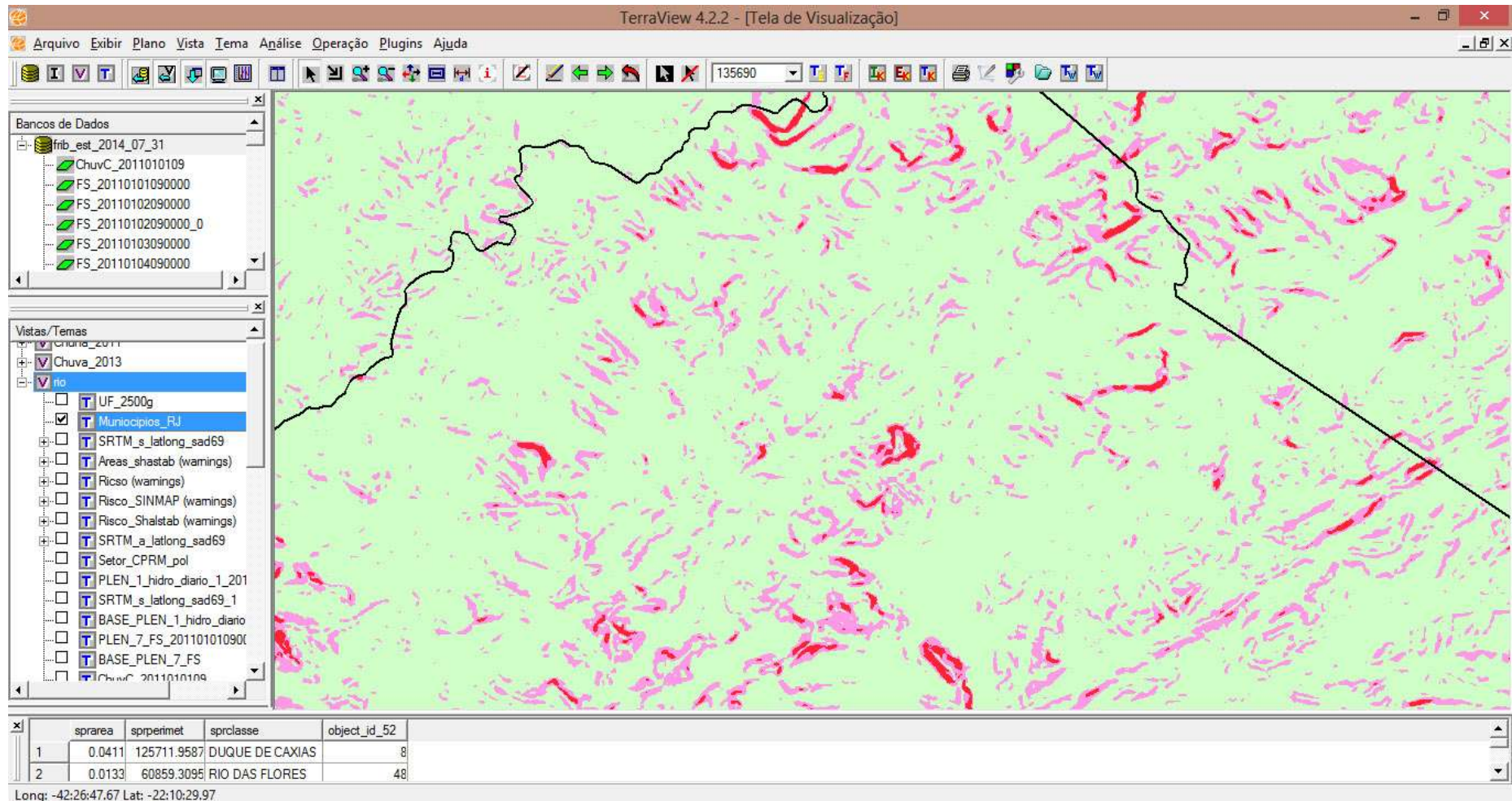
## Classes de estabilidade

Classe	Classes de Estabilidade	Possível influência de fatores não modelados
A	Incondicionalmente Estável e saturado	$a/b > (T/Q)\text{sen}\theta$ e $\tan\theta \leq \tan\emptyset(1-\rho_w/\rho_s)$
B	Incondicionalmente Estável e não saturado	$\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\emptyset}\right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$ $a/b < (T/Q)\text{sen}\theta$ e $\tan\theta \leq \tan\emptyset(1-\rho_w/\rho_s)$
C	Estável e não saturado	$a/b < (T/Q)\text{sen}\theta$ e $\tan\emptyset(1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\emptyset$
D	Instável e não saturado	$a/b < (T/Q)\text{sen}\theta$ e $\tan\emptyset(1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\emptyset$
E	Instável e saturado	$a/b > (T/Q)\text{sen}\theta$ e $\tan\emptyset(1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\emptyset$
F	Incondicionalmente Instável e não saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\emptyset}\right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$ $\tan\theta > \tan\emptyset$ e $a/b < (T/Q)\text{sen}\theta$
G	Incondicionalmente Instável e saturado	$\frac{a}{b} > \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\emptyset}\right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$ $\tan\theta > \tan\emptyset$ e $a/b > (T/Q)\text{sen}\theta$



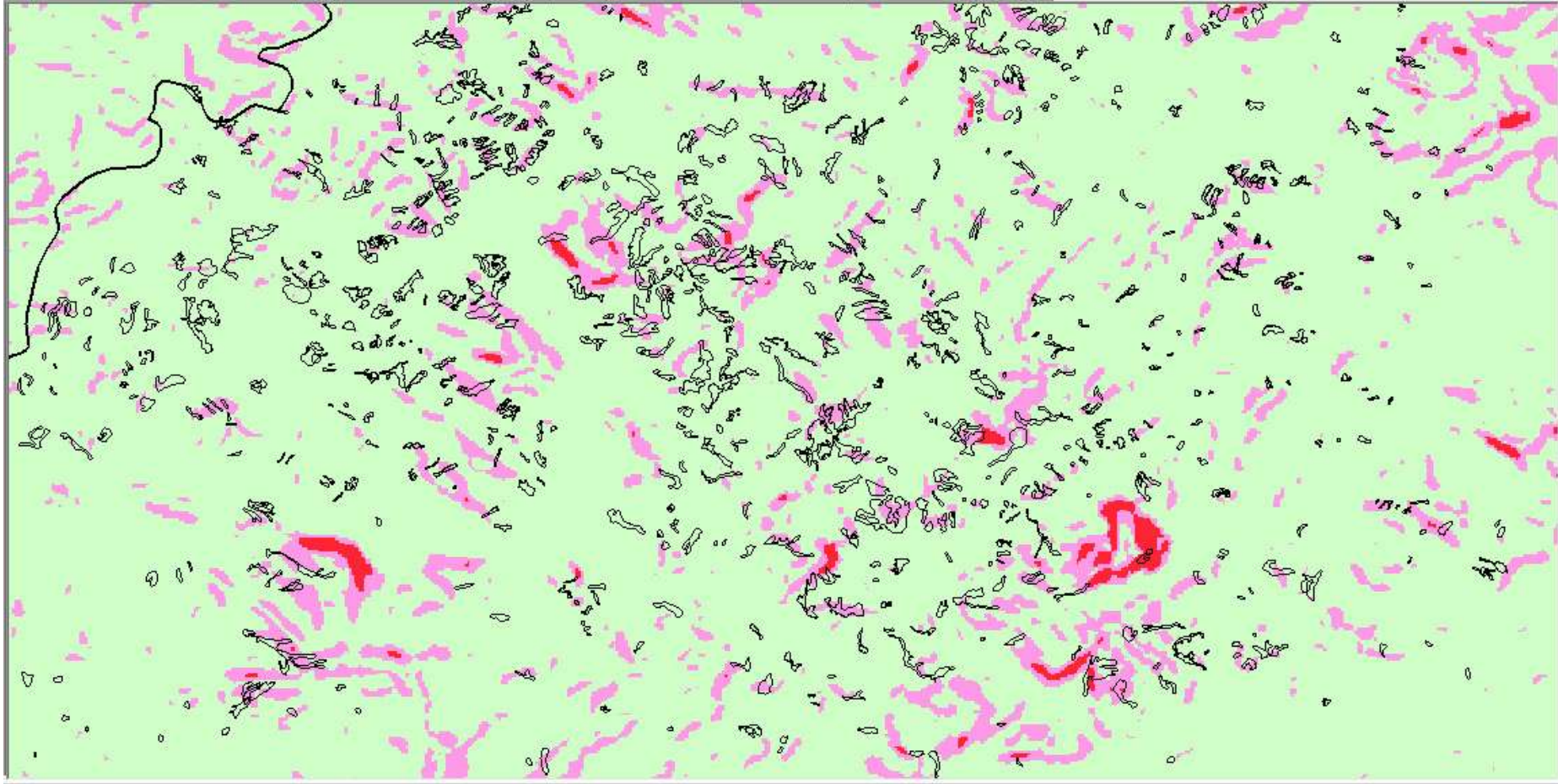
# Índice de estabilidade do SHALSTAB

## Resultados



mapa de FS gerado para o dia 12/01/2011 gerado pelo TerraMA2

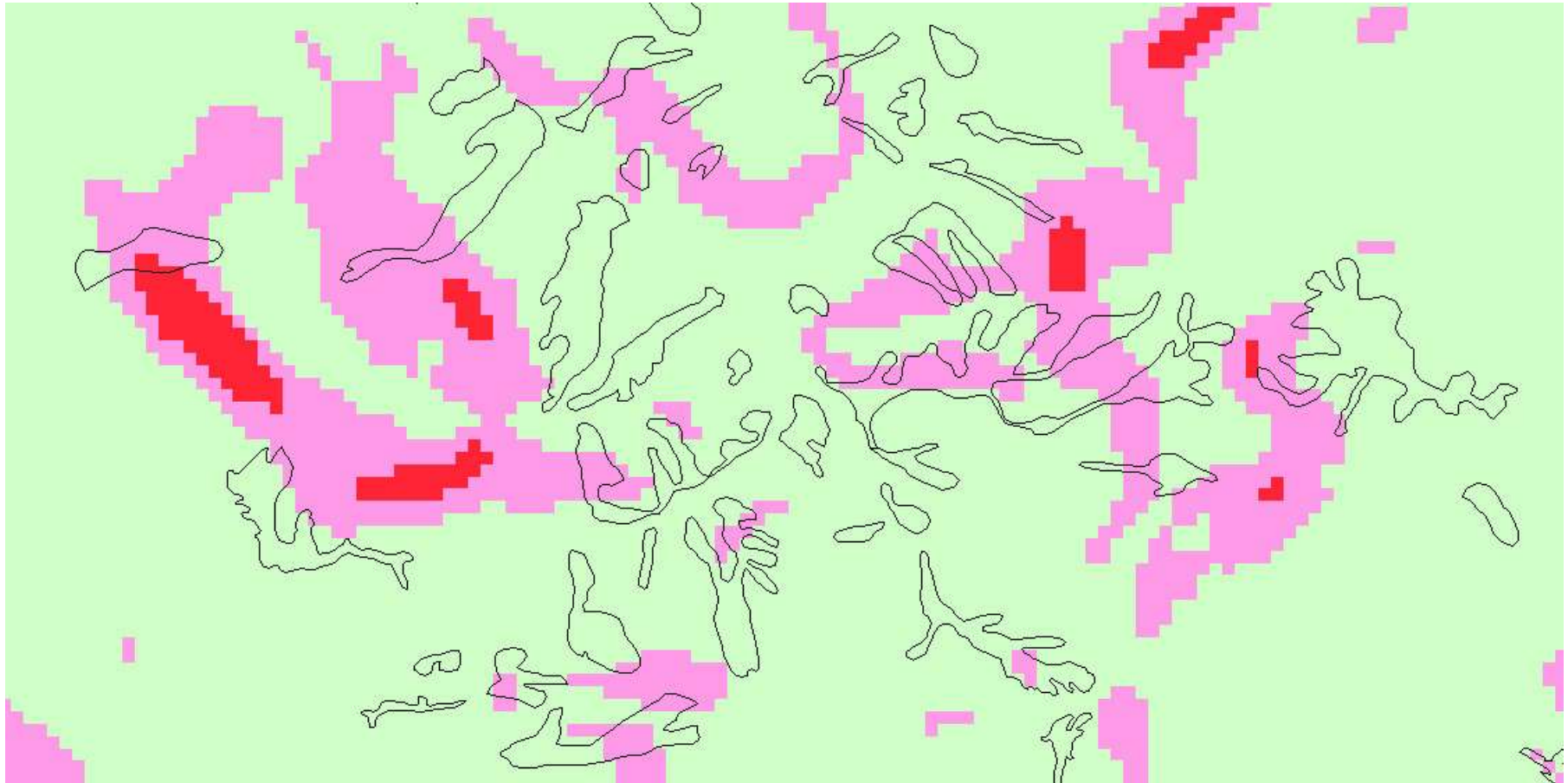
## Resultados



Mapa de FS para 12/01/2011 sobreposto do inventário das cicatrizes dos escorregamentos, gerado pelo TerraMA2

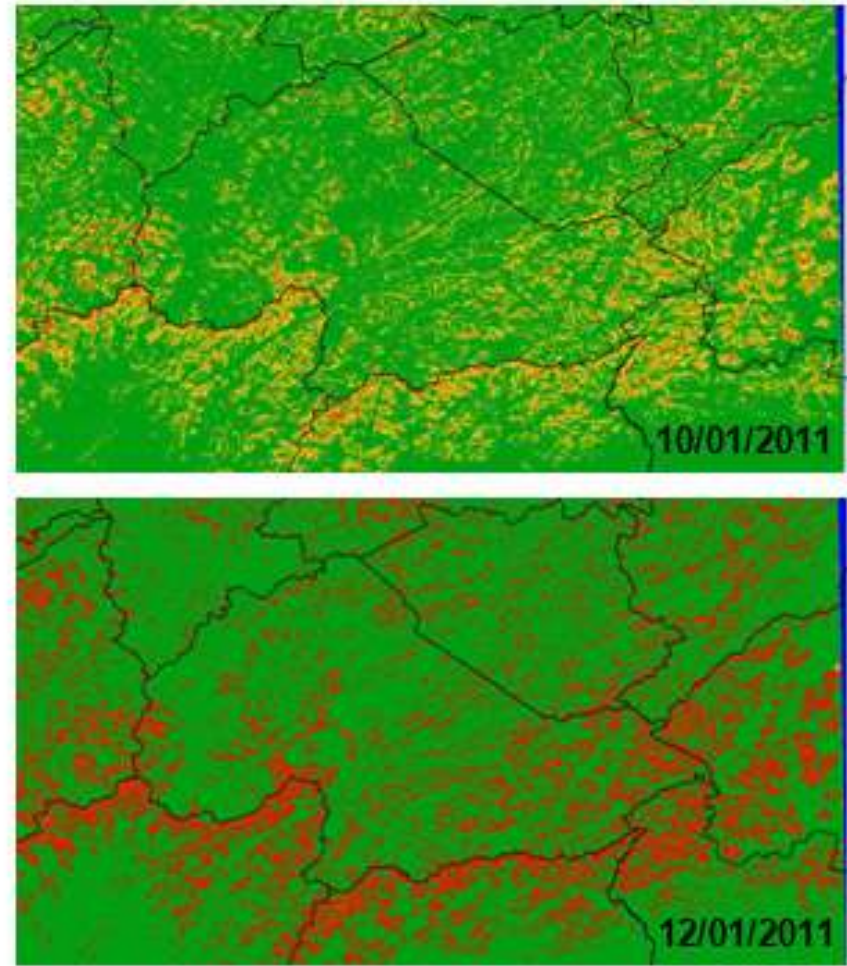
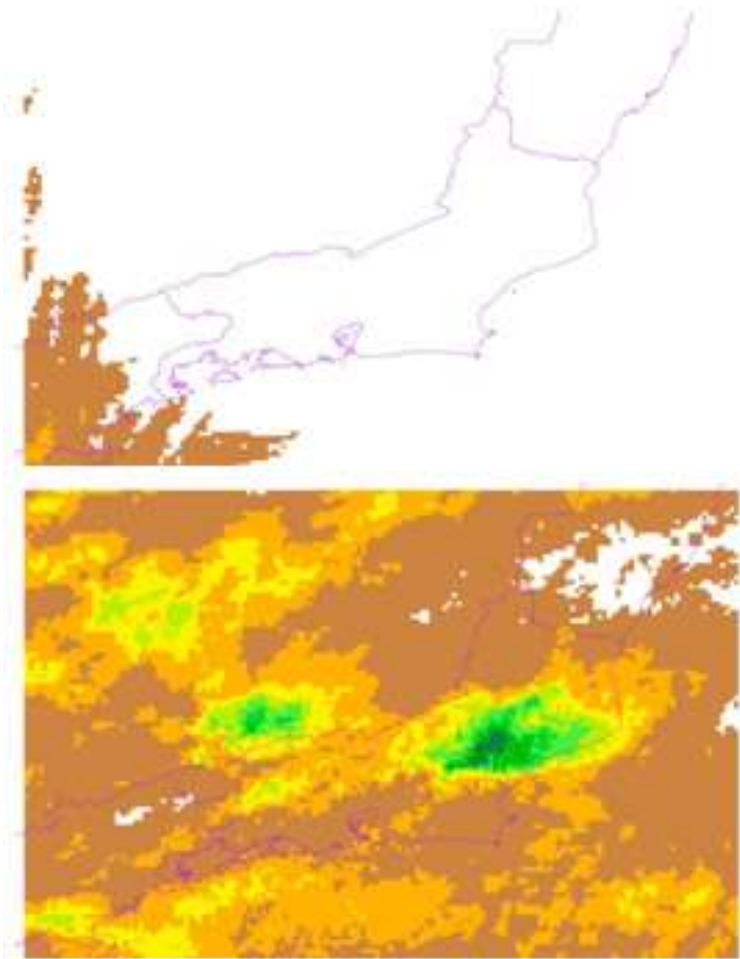


## Resultados



Detalhe do mapa de FS para 12/01/2011 mostrando cicatrizes dos escorregamentos sobre as classes calculadas, gerado pelo TerraMA2.

## Resultados

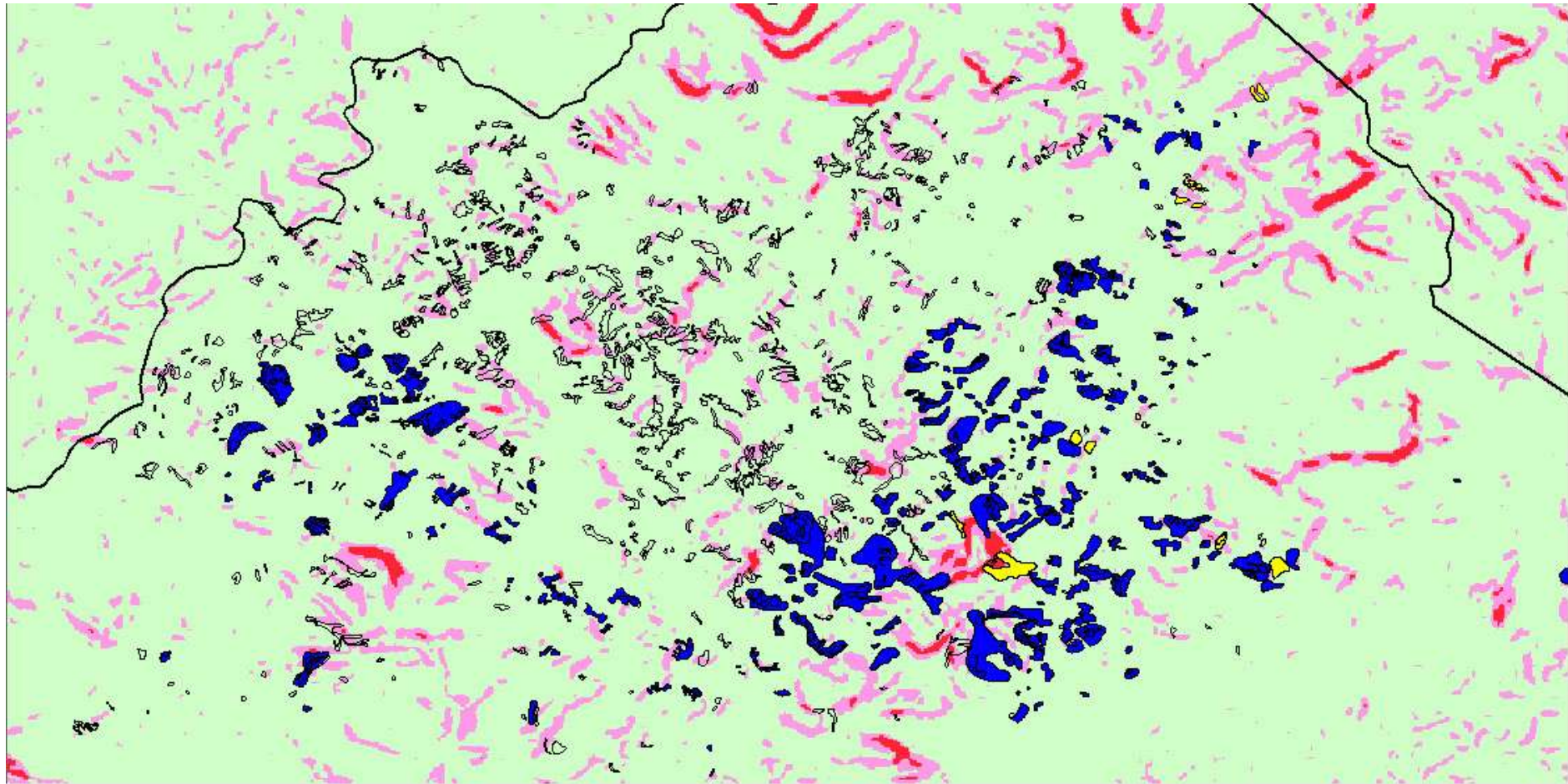


Comparativo entre dados de chuva do hidroestimador (DSA/INPE) à esquerda e mapas de FS gerados pelo SHALSTAB TerraMA2, a direita.



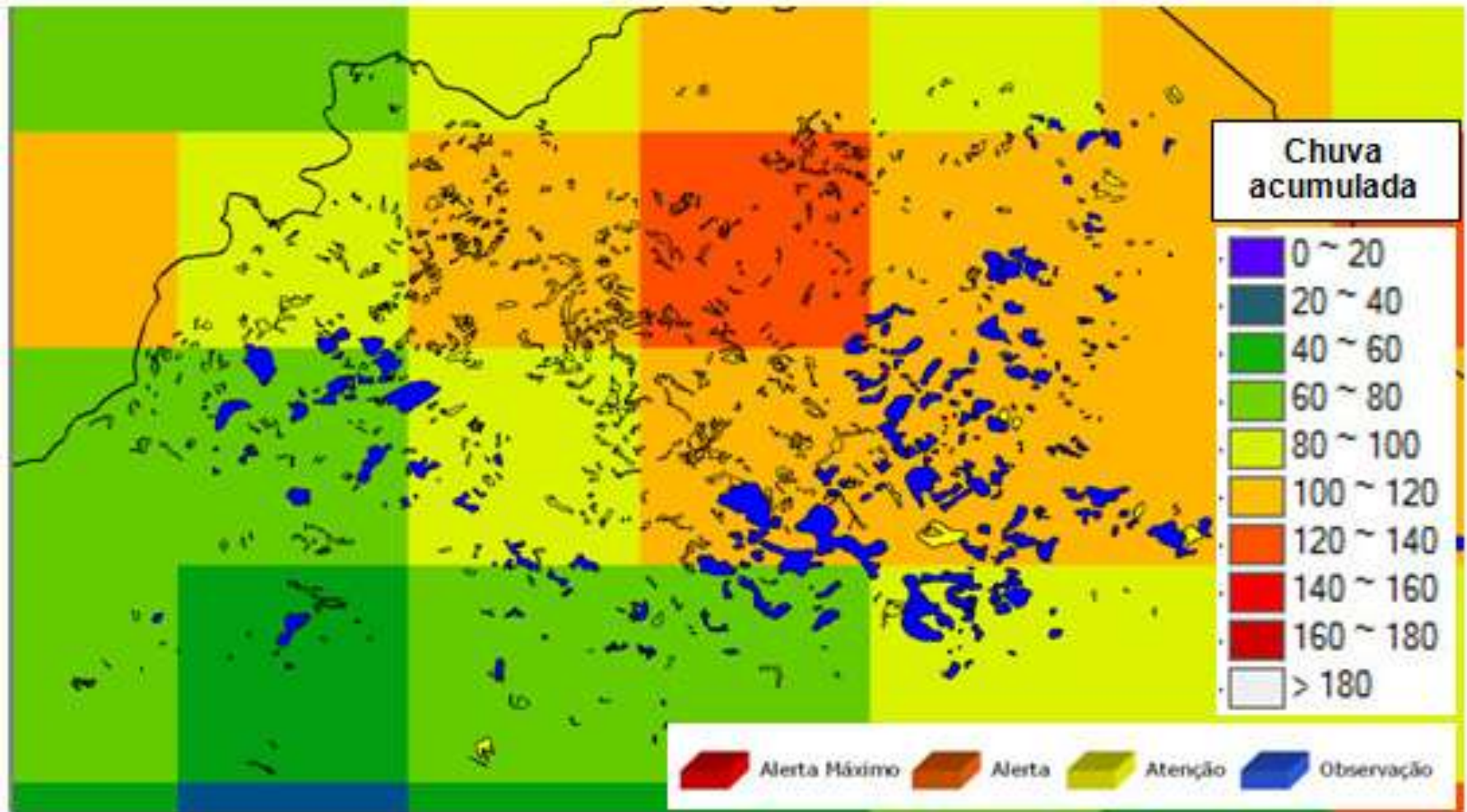
# Índice de estabilidade do SHALSTAB

## Resultados



Mapa de FS sobreposto pelo mapa de polígonos de risco

## Resultados



Polígonos de risco, devidamente coloridos com as cores dos respectivos níveis de alerta calculados pelo SHALSTAB, sobrepostos aos dados de chuva do hidroestimador.



# Método empírico para previsão de corridas de massa

Sub-bacias compreendem as regiões:

Serrana, Metropolitana, Baixada Litorânea e Centro-Sul Fluminense

Sub-bacias em diferentes domínios geomorfológicos

A distribuição das sub-bacias representa as variações em altitude, amplitude e declividades da região.



# Método empírico para previsão de corridas de massa

---

## Definição dos parâmetros morfométricos

- Analisados vários parâmetros morfométricos das sub-bacias
- 
- Foco nos com maior potencial em produzir material às corridas de massa através de escorregamentos generalizados
- Parâmetros morfométricos escolhidos:
  - proporção de áreas com declividades entre 25° a 50°;
  - amplitude topográfica; e
  - circularidade das sub-bacias.



# Método empírico para previsão de corridas de massa

---

## Definição dos parâmetros morfométricos

Proporção de áreas com declividades entre 25° a 50°

Apresentam maior probabilidade de disponibilidade de material para ocorrência de escorregamentos

Amplitude topográfica

Diferença entre o menor e maior valor altimétrico

Utilizado operadores zonais médios no *Spring*

Circularidade das sub-bacias

$$IC = \frac{4\pi A}{P^2}$$

onde, IC é o índice de circularidade (0 – 1),  
A a área da bacia,  
P o perímetro da bacia

# Método empírico para previsão de corridas de massa

---

## Definição dos pesos e ponderações para áreas potenciais a geração de corridas

- Cada parâmetro morfométrico recebeu um valor de peso que variou de 0 à 1 para cada sub-bacia;
- Definição dos pesos pela técnica **AHP** (Processo Analítico Hierárquico), realizada através de uma comparação pareada entre todos as variáveis, no *Spring*.

# Método empírico para previsão de corridas de massa

---

Definição dos pesos e ponderações para áreas potenciais a geração de corridas

A análise espacial no SIG:

- Transformação dos dados para o espaço de referência [0..1]
- Processados por combinação numérica, através de média ponderada.

<i>Elementos na equação</i>	<i>Parâmetro morfométrico</i>	<i>Peso (variando no intervalo de 0 à 1)</i>
a	Declividades entre 25° a 50°	0,603
b	Amplitude altimétrica	0,315
C	Circularidade da bacia	0,082

# Método empírico para previsão de corridas de massa

---

Definição dos pesos e ponderações para áreas potenciais a geração de corridas

O cálculo dos valores finais para o potencial a geração de corridas, para cada polígono de sub-bacia, envolvendo os parâmetros e seus respectivos pesos

$$\text{Potencial de corrida} = a * 0,603 + b * 0,315 + c * 0,082$$

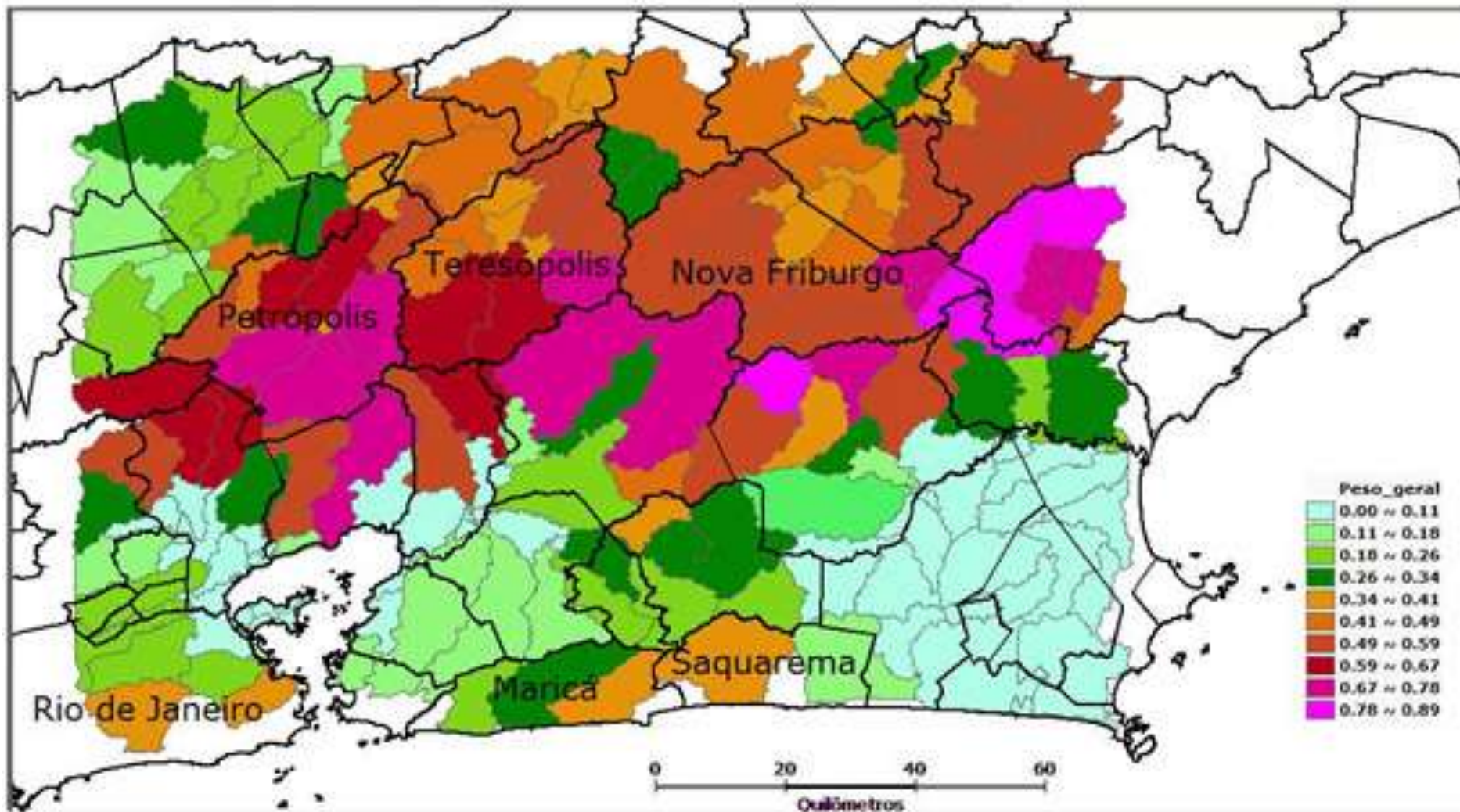
Onde:

0 significa nenhum potencial para geração de corrida e

1 significa potencial máximo.

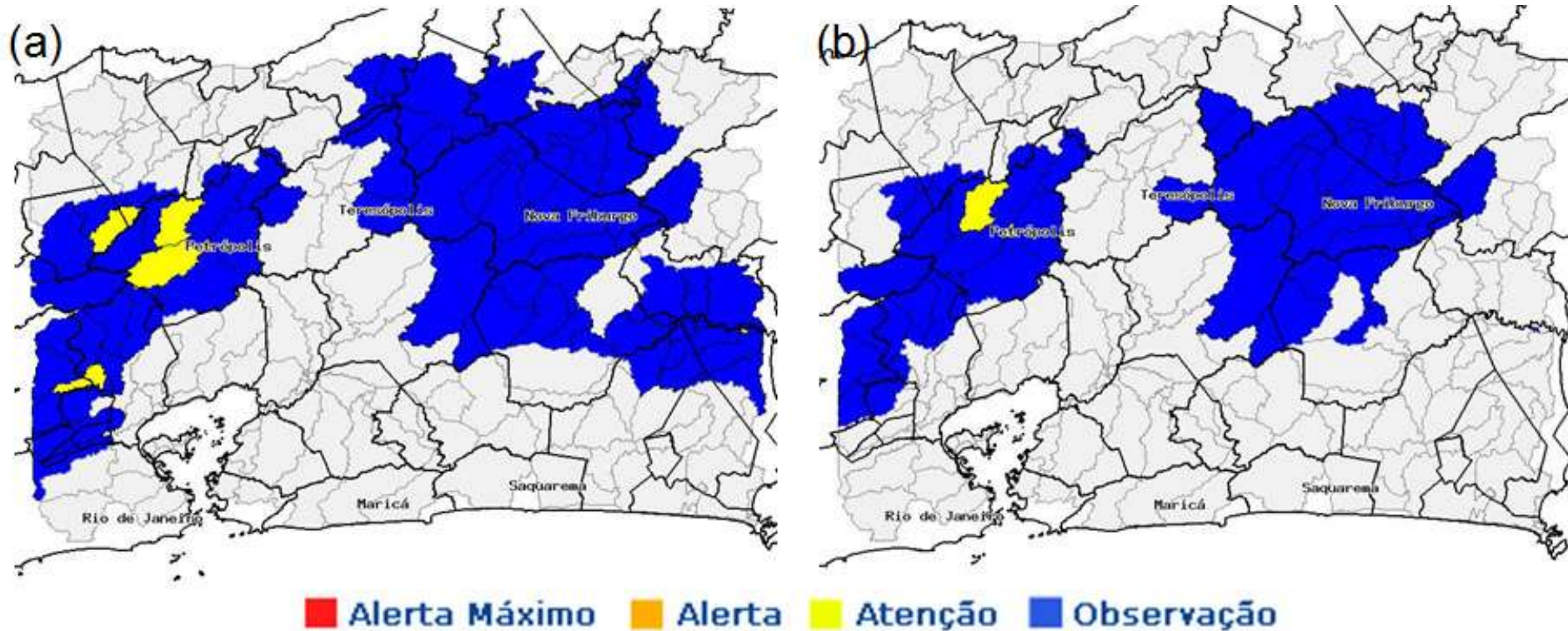


## Resultados



Peso geral para o potencial de corrida, contemplando os três parâmetros morfométricos calculados anteriormente

## Resultados



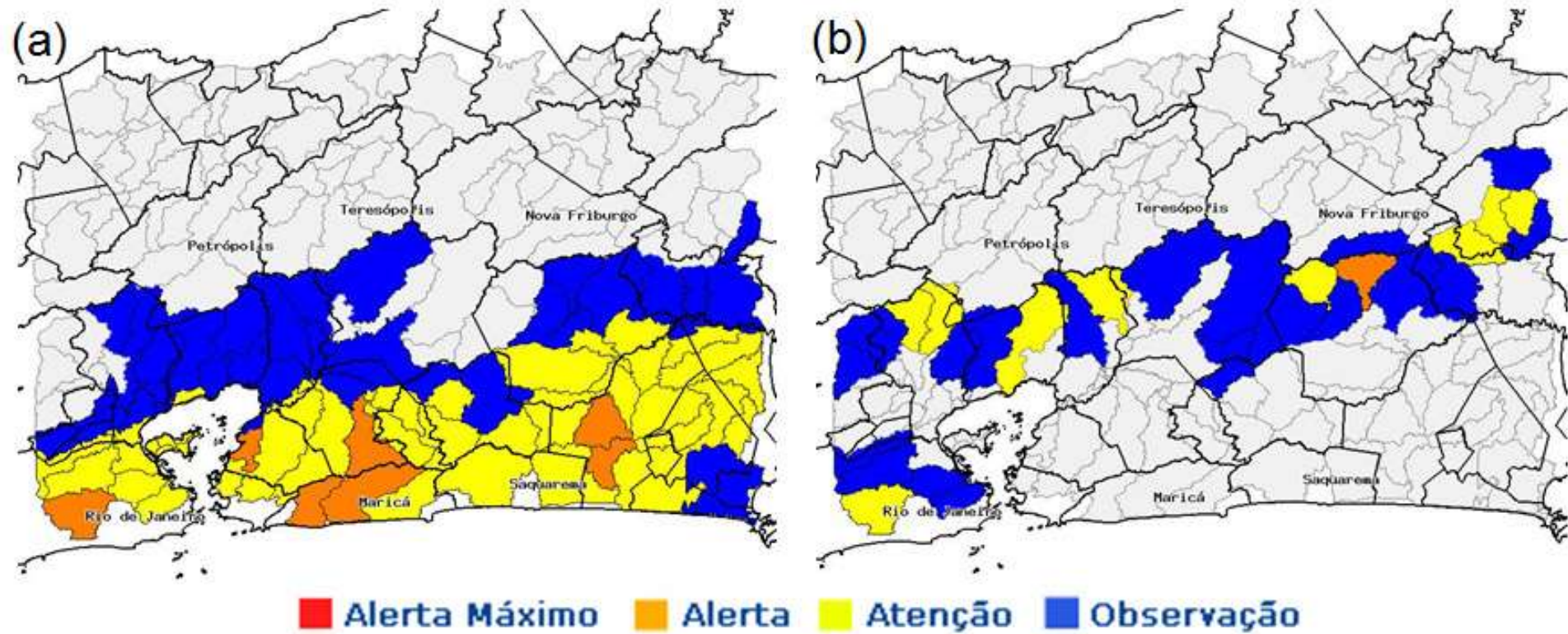
Análise das sub-bacias sobre imagens do radar meteorológico.

(a) quando analisado somente com imagem do radar;

(b) quando analisada imagem do radar multiplicado pelo peso do potencial de corrida.



## Resultados



Análise das sub-bacias sobre imagens do hidroestimador (ultimas 24h) e modelo de previsão Eta (próximas 12h).

(a) quando analisado somente com imagem do hidroestimador e Eta;  
(b) imagem do hidroestimador e Eta multiplicado pelos pesos

# Extração automática de cicatrizes

Usando conceitos de *Geobia* e *Data Mining*

Ambientes: *GeoDMA* e *TerraPixel*

The screenshot shows the TerraView 4.2.2 interface with the GeoDMA Plugin window open. The plugin window has several tabs: Segmentation, Input, Features, Train, Visualize, Classify, Valide, Multitemporal (MT), and About. The Segmentation tab is selected, showing a list of layers and a table of polygon features. The main window displays a satellite image of a landscape with a grid overlay.

The GeoDMA Plugin window contains the following text:

This is GeoDMA - Geographic Data Mining Analyst  
To start using **GeoDMA**, select the input data

The Layer with **Polygons** contains objects from segmentation. You can import a shape file in TerraView menu **File -> Import Data**, or use **Segmentation**, in the left tab.

The Layer with **Cells** contains a grid of cells. To create a grid, use TerraView menu **InfoLayer -> Create Cells**

The Layer with **Points** contains a set of sample points. To create point set, use TerraView menu **Analysis -> Generate Sample Points**.

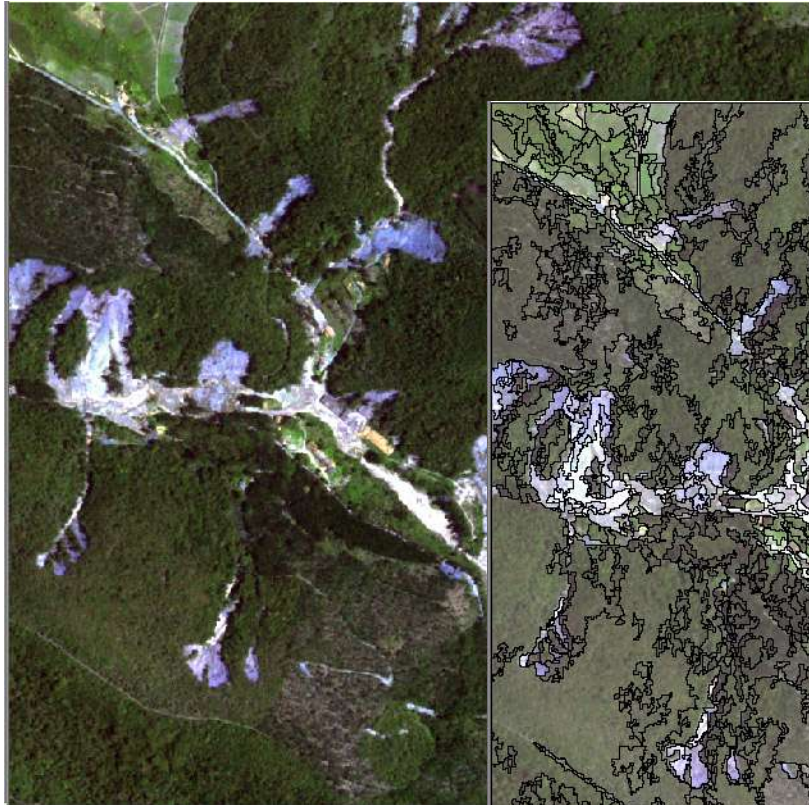
The Layer with **Raster Data** contains images. To import images, use TerraView menu **File -> Raster Import**.

The table of polygon features is as follows:

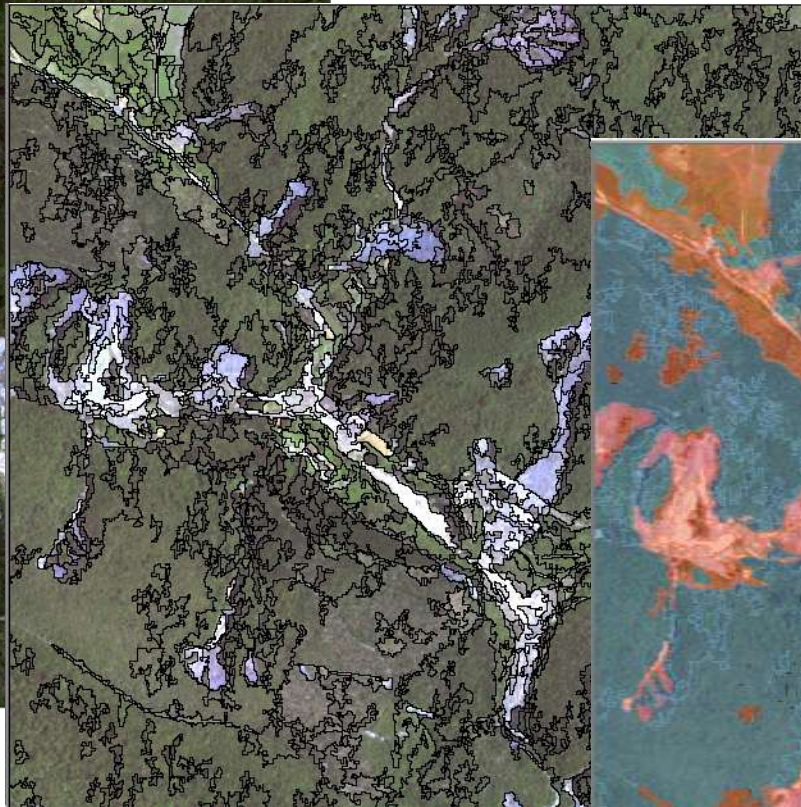
id	training_class	validation_class	p_angle	p_area	p_box_area	p_circle	p_compacty	p_density	p_elliptic_ft	p_fractal_dimension	p_gyraton_radius	p_length	p_perimeter	p_perimeter_area_r	p_rectangular_ft	p_shape_iv
1	2538		0.6033914	104.96	230.4	0.7367917	0.05951744	9.316154	0.8361037	1.191594	5.349458	14.4	64	0.6097561	0.4555556	1
2	3362		0.9590448	76.8	184.32	0.8835278	0.09033619	5.291998	0.7806524	1.253705	7.222019	14.4	60.8	0.7916667	0.4166667	1
3	131		0.9802013	66.56	225.28	0.9270675	0.1178583	3.627597	0.4045633	1.320877	8.774692	17.6	64	0.9615385	0.2954545	1
4	3134		1.515952	145.92	286.72	0.8334595	0.04175472	8.737603	0.7025807	1.168901	8.407348	22.4	73.6	0.504386	0.5089286	1
5	1198		0.5715347	107.52	184.32	0.8864895	0.05453425	6.192095	0.9145964	1.163524	8.130083	12.8	60.8	0.5654762	0.5833333	1
6	1286		1.168358	117.76	358.4	0.8734403	0.06510684	6.842606	0.7093197	1.272878	6.284934	22.4	83.2	0.7065217	0.3285714	1



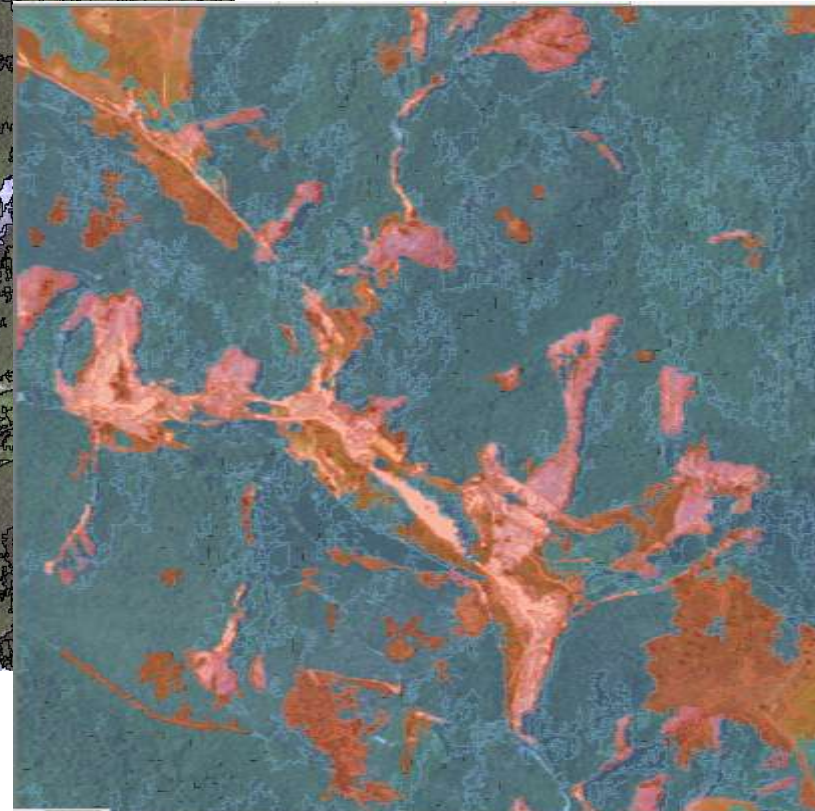
## Resultados preliminares



Recorte GeoEye-1



Segmentação



Classificação  
*Geobia + Data Mining*

## Conclusões

---

### *a) Extração de dados hidrológicos e morfométricos:*

A partir de MDE, podem ser usadas várias técnicas e ambientes diferentes, onde cada software específico apresenta maior eficácia na geração de cada produto;

### *b) Modelo SINMAP:*

Funcionamento bem mais otimizado no TerraMA2;

Resultados com maior acurácia por conta da maior precisão na manipulação dos parâmetros e variáveis envolvidos nos cálculos e processamentos;

Perdeu a limitação de tamanho da implementação original;

## Conclusões

---

### *b) Modelo SINMAP:*

A grande melhoria foi a capacidade de ser executado para monitoramento em tempo real utilizando entrada de dados geoambientais dinâmicos;

Resultados gerados foram muito satisfatórios, podendo ainda ser melhorados com a entrada de dados de maior qualidade (principalmente altimetria), dados esses não disponíveis no momento dessa pesquisa;

# Conclusões

---

## c) *Modelo SHALSTAB*:

Funcionando no ambiente TerraMA2, mas necessita de algumas melhorias para ficar operacional;

Necessita dados para validação. Visto ambiente original não funcionando bem e com muitas limitações.



## Conclusões

---

### *d) Método empírico para previsão de corridas de massa:*

Gerou bons resultados e encontra-se operacional na plataforma TerraMA<sup>2</sup>.

### *e) Extração automática de cicatrizes de escorregamento:*

A partir da grande demanda por inventários de cicatrizes;

Mostrando-se uma alternativa complementar na geração de tais inventários;

Coisa nova, precisam de mais investimento de tempo para estar operacional na extração das cicatrizes de escorregamentos.

## Perspectivas futuras...

---

Pretende-se continuar colaborando e mantendo atividades de pesquisa com a equipe do INPE/TerraMA2.

Ser agente disseminador do TerraMA2 e suas funcionalidades, bem como das iniciativas para minimizar os impactos provocados pelos eventos ambientais extremos e evitar os desastres naturais.

## Recomendações...

---

- a) Adquirir e gerar dados (ex.: dados altimétricos, mapeamento urbano etc.) de melhor qualidade e em escala de maior detalhe, para entrada nos modelos aqui implementados, a fim de produzir análises com maior confiabilidade e com possibilidade de validação através de métodos estatísticos mais robustos;
  
- b) Promover atividades de campo para coleta de pontos de apoio com receptores GNSS para correção geométrica de imagens de satélite, geração de dados altimétricos complementares de qualidade, atualização de base existente, validação das cicatrizes extraídas de forma automática e das áreas de risco mapeadas, medidas de parâmetros de solo, geologia e geomorfologia etc.;

## Recomendações...

---

c) Continuar investigando sobre parâmetros de entrada dos modelos (ex.: transmissividade e espessura dos solos etc.) para refinamento e aprimoramento dos modelos ora implementados;

d) Dados de chuva acumulada em tempo real:

**previsão + dados observados**

Hoje, faltam operadores zonais implementados na plataforma TerraMA2. ([Previsão para nova versão do TerraMA2](#)).

e) Possibilidade de integração de dados de chuva de melhor qualidade:

ex.: radar meteorológico e pluviômetros da Prefeitura do RJ



## Divulgação dos resultados

---

Publicados ou no prelo:

1) Título: **Análise morfométrica em sub-bacias hidrográficas para monitoramento do risco potencial a corridas de massa (debris flows) na Região Serrana do Rio de Janeiro.**

Publicado e apresentado nos Anais do 14 CBGE (2013), no Rio de Janeiro-RJ;

2) Capítulo: **Sensoriamento Remoto para Deslizamentos**, será lançado no livro: **Sensoriamento Remoto para Desastres Naturais**, no XVII SBSR 2015, pela Editora Oficina de Textos. No prelo, em fase de edição final pela editora.

## Divulgação dos resultados

---

Em fase de redação do manuscrito:

9 título em fase de redação do manuscrito, a serem submetidos para publicação em periódicos científicos;

1 título em fase de redação para o XVII SBSR 2015.

# Agradecimentos...

---



# Referências Bibliográficas (apresentação)

---

- ARRUDA JUNIOR, E.R. & LOPES, E.S.S. Análise morfométrica em sub-bacias hidrográficas para monitoramento do risco potencial a corridas de massa (*debris flows*) na Região Serrana do Rio de Janeiro. Anais do 14º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, dez de 2013, Rio de Janeiro.
- CARSON, M. A.; KIRKBY, M. J. Hillslope Form and Process. Cambridge: Cambridge University Press, 1972.
- DIETRICH, W. and D. MONTGOMERY. SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), pp. 29, 1998.
- O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. Water Resources Research, v.22, p.794-804, 1986.
- PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N.; PRASA A. SINMAP 2. A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping, technical description and users guide for version 2.0. Utah State University. 2005. Disponível em: <<http://hydrology.usu.edu/sinmap2/sinmap2.PDF>>, acesso em: 10 fev 2012.
- SELBY, M. J. Hillslope Materials and Processes. New York: Oxford University Press, 1993. 446p.