

# DIAGNÓSTICO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO NA ESTABILIDADE DE VERTENTES DO ALTO E MÉDIO CURSO DA BACIA DO RIO SAGRADO, PR - BRASIL

*Nicole Borchardt*

08/Julho/2005

Departamento de Pós-Graduação em Geologia

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:**

**DIAGNÓSTICO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO NA ESTABILIDADE DE  
VERTENTES DO ALTO E MÉDIO CURSO DA BACIA DO RIO  
SAGRADO, PR - BRASIL**

**AUTORA:**

*Nicole Borchardt*  
nicole@ufpr.br

**ORIENTADOR:**

*Prof. Dr. Alberto Pio Fiori*

**CO-ORIENTADORA:**

*Prof<sup>ta</sup>. Dr<sup>a</sup>. Chisato Oka Fiori*

Área de concentração: Geologia Ambiental

Linha de Pesquisa: Estabilidade de taludes e análise multitemporal da dinâmica ambiental

Projeto Guarda-Chuva: Dinâmica e evolução das vertentes da Serra do Mar

08/Julho/2005

# Objetivos da dissertação

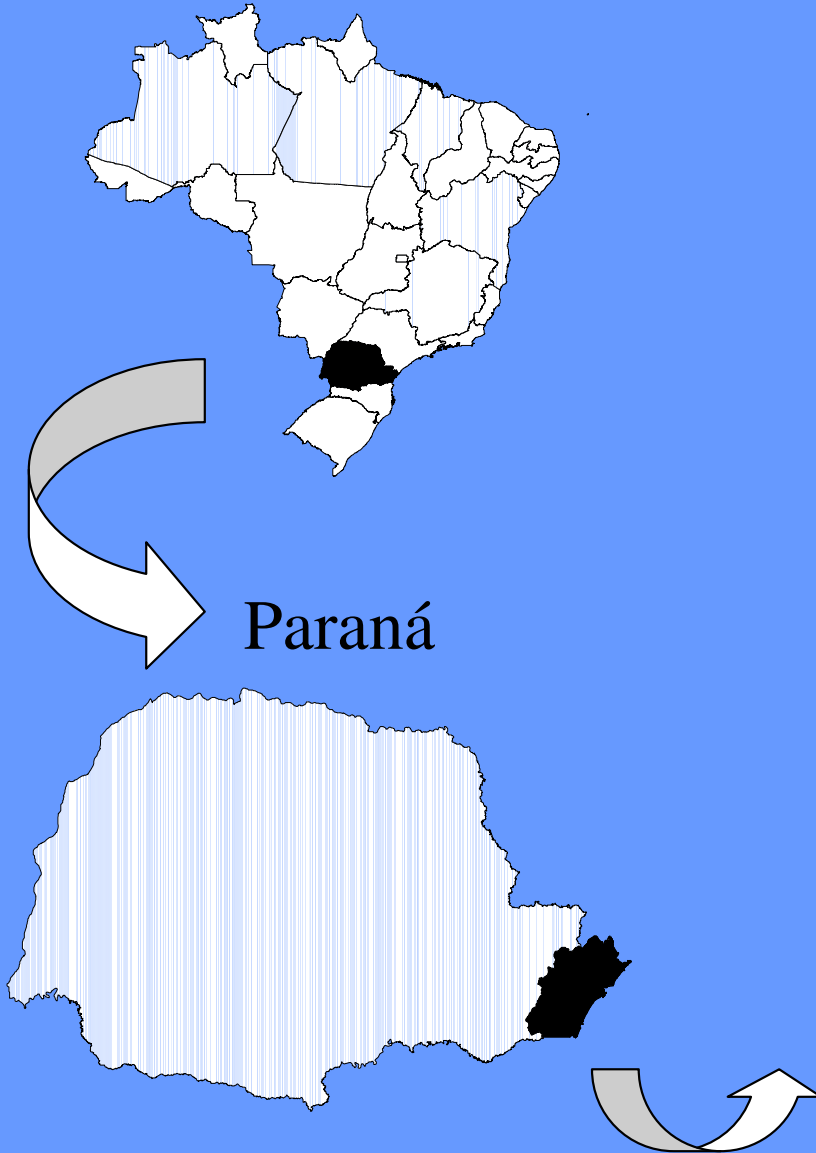
**O maior desafio deste trabalho foi caracterizar geológica e geotecnicamente as encostas de uma área piloto e desenvolver um método para cartografar os Fatores de Segurança das mesmas, visando determinar áreas de risco de escorregamento.**

## Metas:

- ✓ elaborar Mapa Topográfico base;
- ✓ elaborar Mapa Geológico;
- ✓ elaborar Mapa Pedológico;
- ✓ caracterizar os processos de escorregamentos atuantes nas encostas da área escolhida;
- ✓ elaborar modelo digital de elevação;
- ✓ elaborar Mapa Clinográfico;
- ✓ cartografar as cicatrizes de escorregamentos;
- ✓ caracterizar os solos através de ensaios laboratoriais;
- ✓ classificar geotecnicamente os solos com base nos ensaios;
- ✓ determinar atributos geotécnicos (coesão e ângulo de atrito interno) por retroanálise;
- ✓ calcular Fator de Segurança para diversas situações;
- ✓ elaborar Mapas de Fatores de Segurança para as situações simuladas;
- ✓ atestar a confiabilidade do método aplicado comparando os atributos geotécnicos retroanalizados ...  
...com aqueles determinados em laboratório.

# Localização da área piloto

Brasil



Paraná

## Planície Litorânea

678.005.04  
7.239.878.20



678.005.04  
7.239.878.20

Fonte: Imagem de satélite Landsat7-TM<sup>+</sup>, composição colorida (RGB)  
das bandas 3, 4 e 5, cena 220-77 (2002)

# Material

## Folha Topográfica:

RIO SAGRADO, numeração SG-22-X-D-V-1-NE, escala 1:25.000, articulação MI-2858-1-NE.

*Fonte: Exército Brasileiro (1996)*

## Softwares:

*Esri® Arc View®, versão 3.2;*

*PanaVue ImageAssembler, versão 2.05;*

*AutoCad Map R2;*

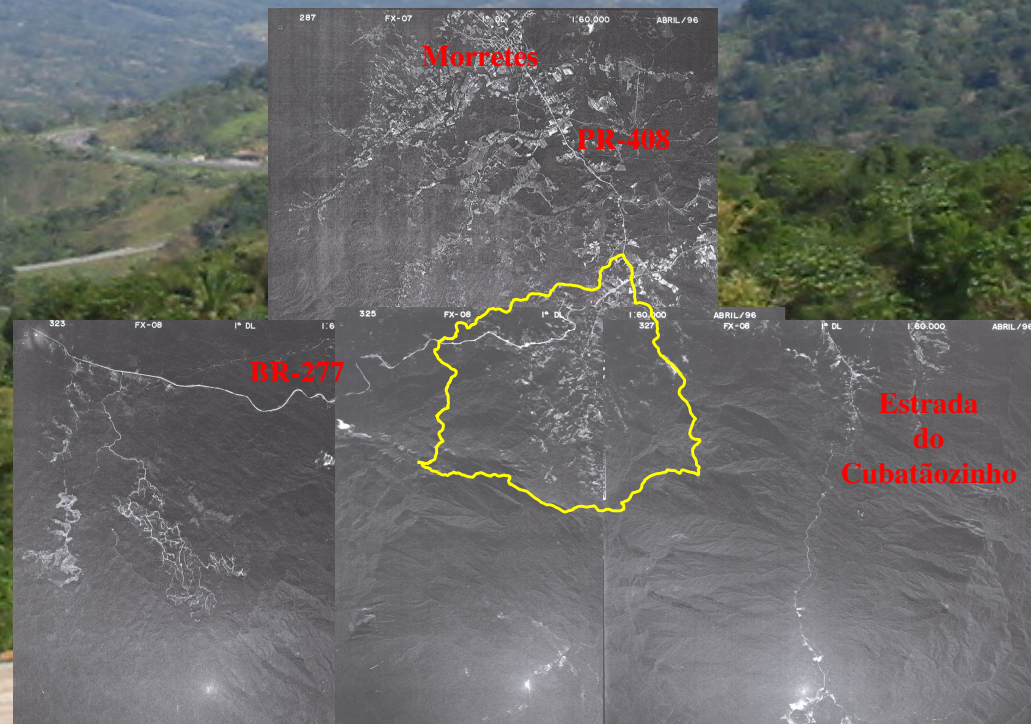
*Microsoft® Excel2000;*

*Microsoft® Word2000;*

*Aldus FreeHand®, versão 9.0.*

## Produto de sensoriamento remoto:

Fotos aéreas pancromáticas, escala 1:60.000.

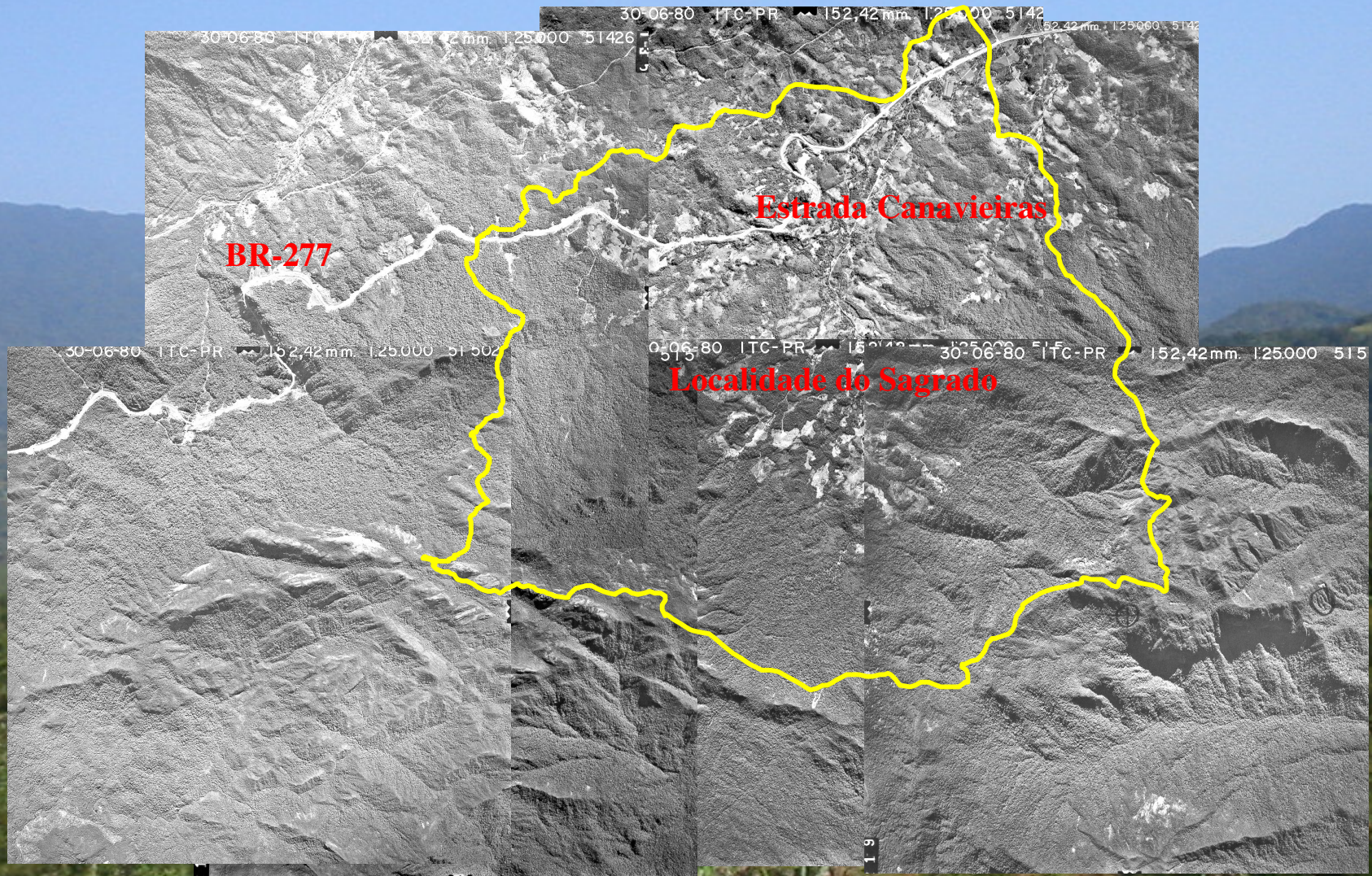


*Fonte: 1ª. Divisão de Levantamento do Ministério do Exército (1996)*

# Material

## Produto de sensoriamento remoto:

Fotos aéreas pancromáticas, escala 1:25.000.



*Fonte: Instituto de Terras e Cartografia do Paraná (1980)*

# Método

## **1. ATIVIDADES DE ESCRITÓRIO (INICIAL)**

- ✓ revisão bibliográfica
- ✓ fotointerpretação
- ✓ compilação de dados em meio digital

## **2. ATIVIDADES DE CAMPO**

- ✓ caracterização geral da área
- ✓ avaliação das áreas de escorregamento
- ✓ coleta de amostras de solo

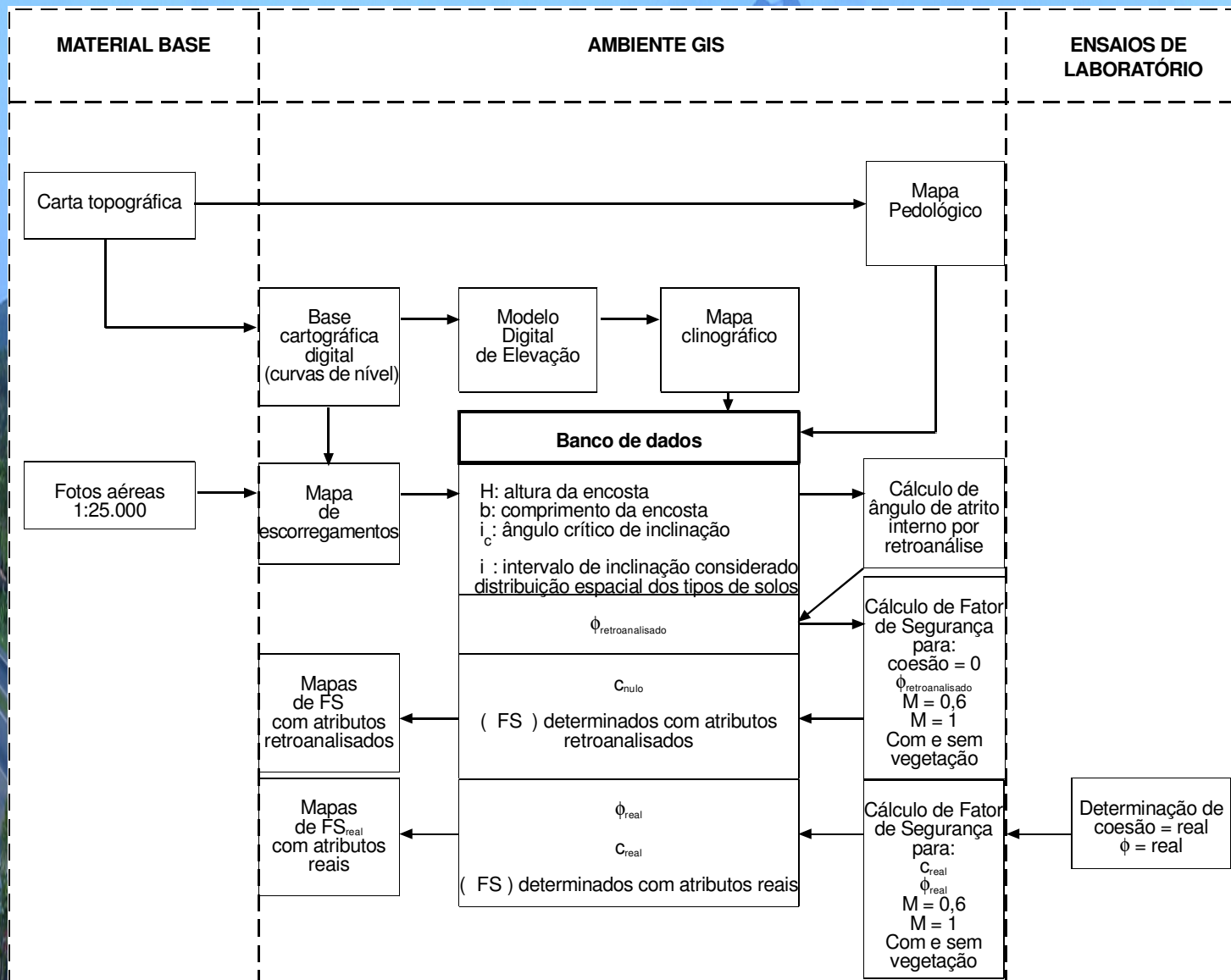
## **3 ATIVIDADES DE LABORATÓRIO**

- ✓ determinação de parâmetros geotécnicos dos solos (coesão e ângulo de atrito interno)

## **4. ATIVIDADES DE ESCRITÓRIO (FINAL)**

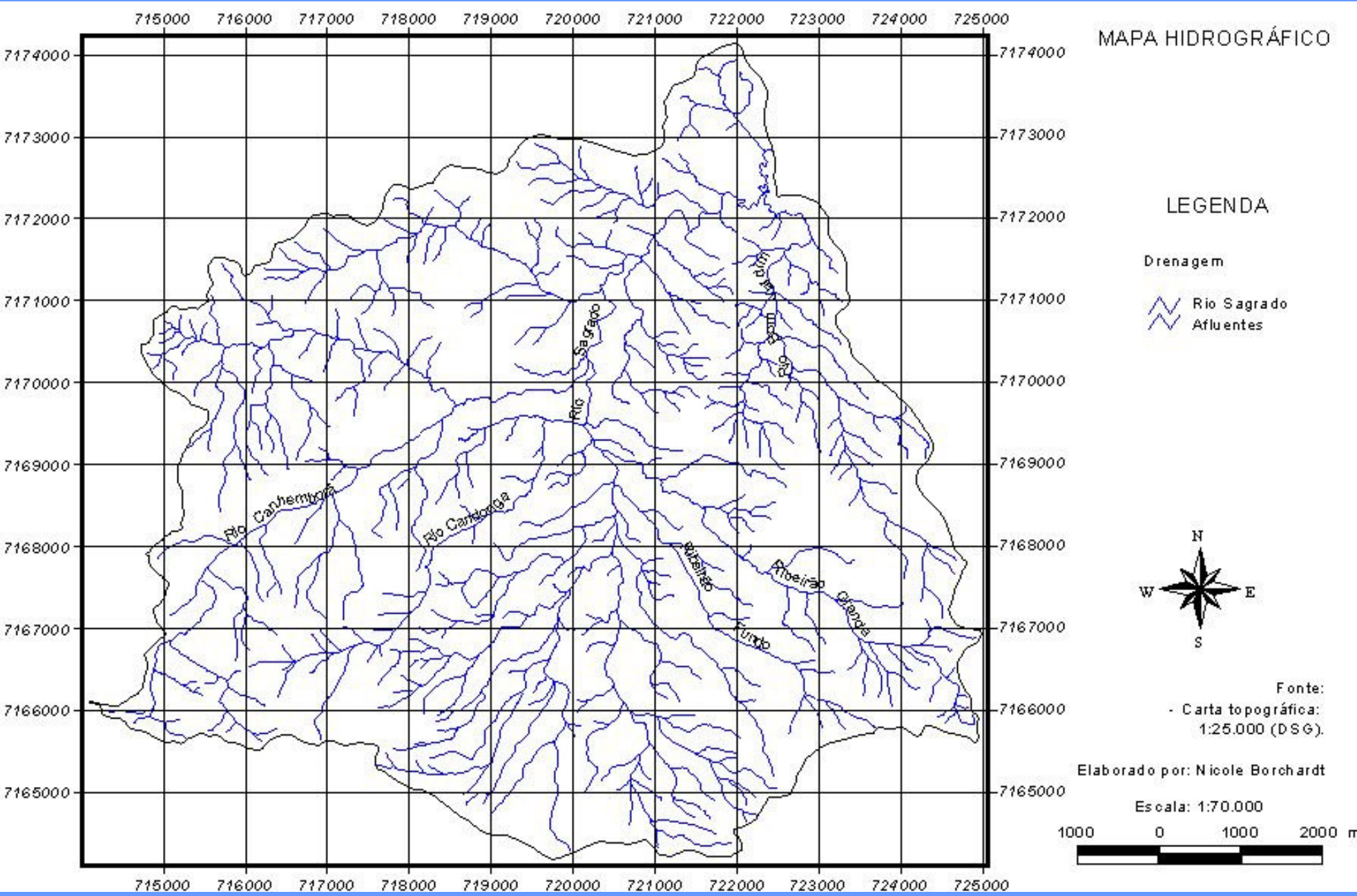
- ✓ aplicação de metodologia para determinação de Fator de Segurança por meio de retroanálise
- ✓ apreciação dos resultados

# Fluxograma de atividades



# A região do alto e médio curso do rio Sagrado

## Bacia Hidrográfica:



# Justificativa da escolha da área

A região é palco de eventos naturais, como chuvas torrenciais, que deflagram grandes escorregamentos, sendo estes, inclusive, noticiados em rede local e nacional, com conseqüentes perdas de cunho material e de vidas humanas.



Foto: Nicole Borchardt (2004)

Dada a importância e a intensidade do tráfego neste trecho da rodovia, os problemas desencadeados por um escorregamento geram riscos que justificam o estudo criterioso das suas causas para orientar medidas preventivas que minimizem tais impactos.



Fonte: Jornal do Estado (2002)

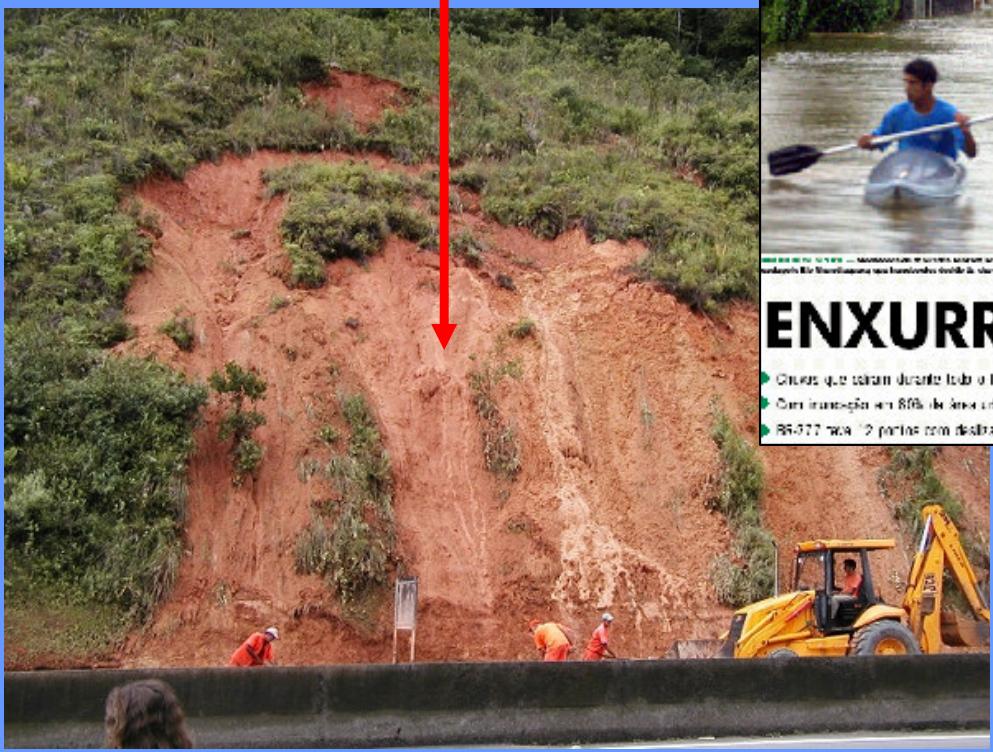
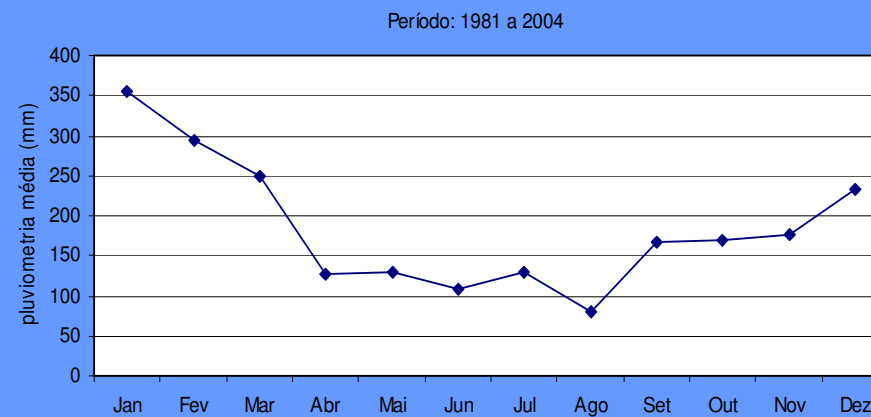
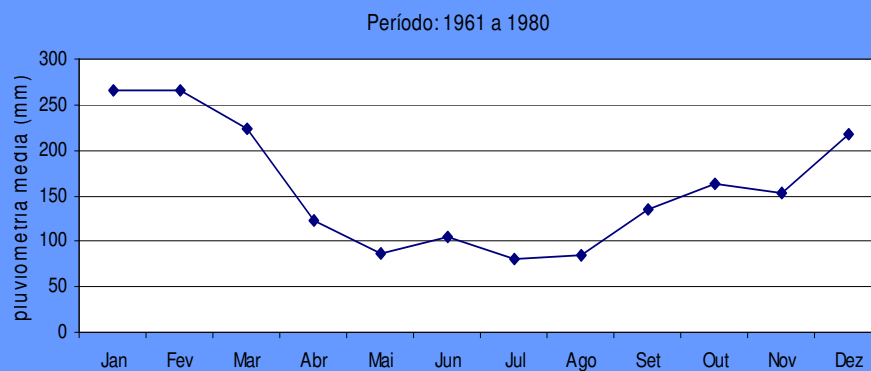
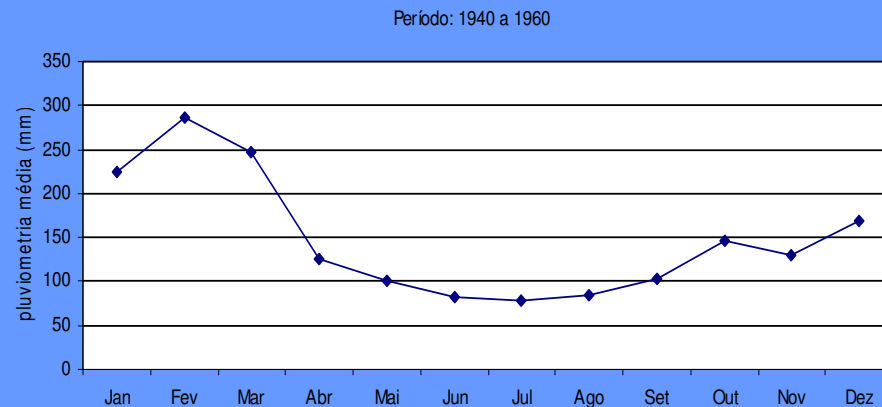


Foto: Renato Eugênio de Lima (2003)

# O período mais crítico de chuvas:

## Índices pluviométricos comprovam as máximas para os meses de janeiro e fevereiro



Fonte: Gráficos elaborados a partir de dados fornecidos pela SUDERHSA (Estação Morretes).

# Contexto sócio-econômico



BR-277  
Tráfego intenso

Estabelecimentos comerciais  
à beira da rodovia

## Ocupação antrópica:



Pousada dos Anjos



Chácara de lazer



Plantio



Ecoturismo

# Caracterização fisiográfica da área de estudo

## Geomorfologia:

|          | <i>Sub-região</i>    | <i>Unidade Ambiental Natural (UAN)</i> |
|----------|----------------------|--|
| <b>1</b> | Montanhosa Litorânea | Serras<br>Áreas Colúviais              |
| <b>2</b> | Planície Litorânea   | Morros<br>Planícies Aluviais           |

(Fonte: Modificado de IPARDES, 1989)

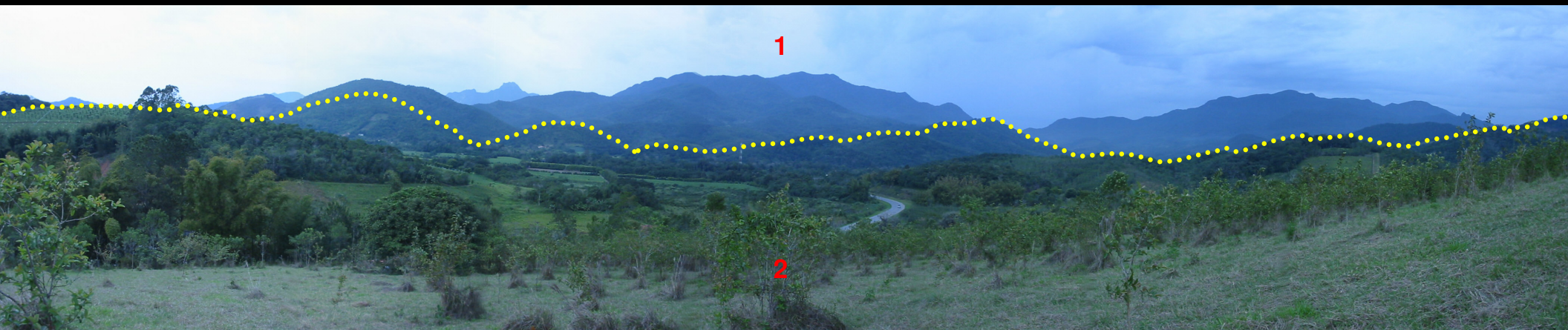


Foto: Nicole Borchardt (2004)

Serrinha

Serra das Canavieiras



Cristas angulosas das serras ao fundo.



Área coluvial.

Fotos: Nicole Borchardt (2004)

## Planície aluvial do rio Sagrado



*Foto: Simone Kozciak (2003)*

Ocorrência de seixos  
e matacões arredondados  
no leito do rio.

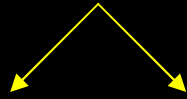


*Foto: Simone Kozciak (2003)*

Lâmina d'água límpida e rasa,  
com deposição marginal  
de seixos.

**Geologia:**

**Complexos Proterozóico Inferior**



**Complexo Granítico-Gnáissico**

**Complexo Gnáissico-Migmatítico**

**Granitos do Proterozóico Superior**



**Suíte Álcali-Granitos**



**Ex: Granitóide**



**Ex: Quartzito**



**Intenso fraturamento**



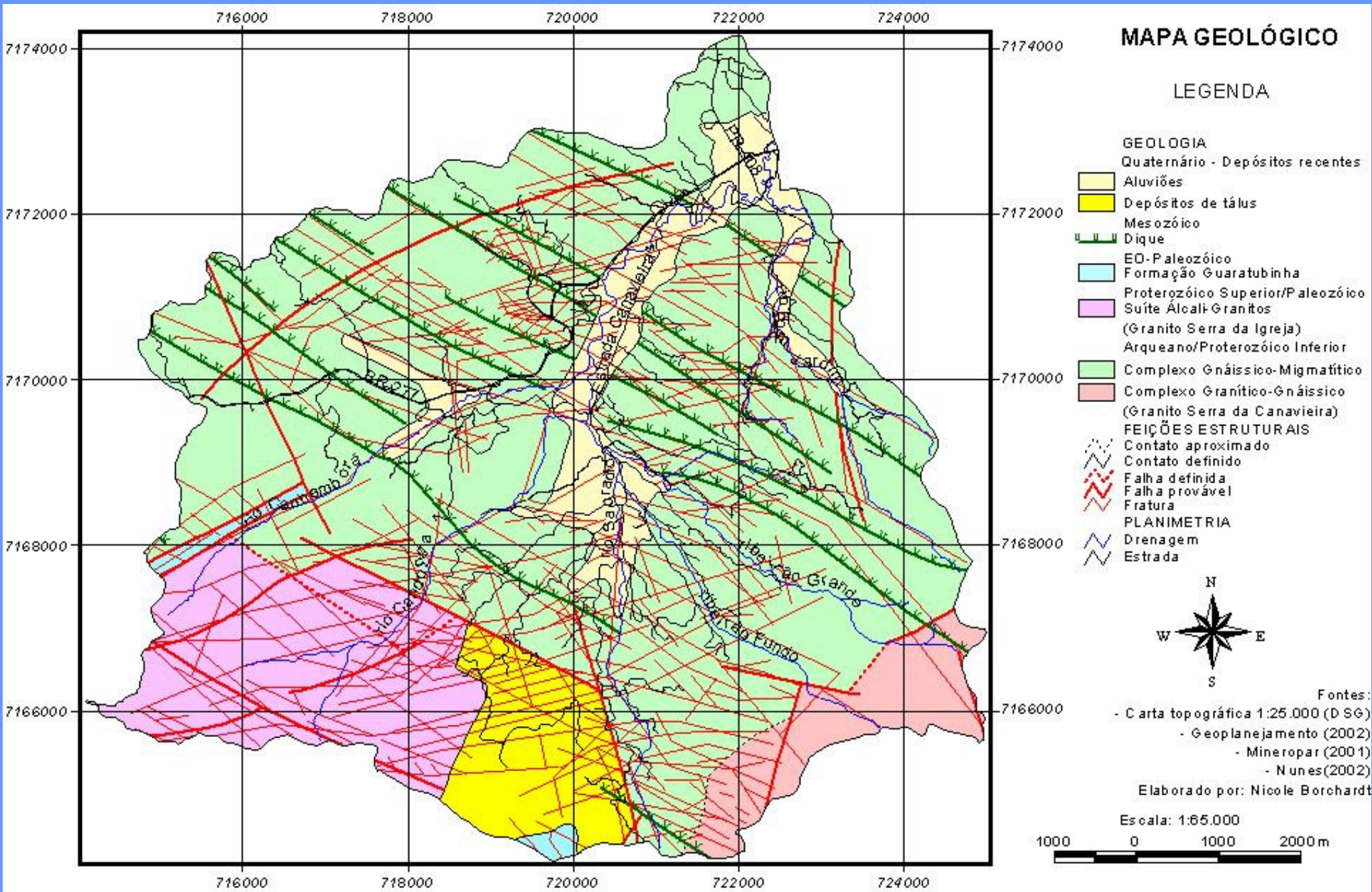
**Ex: Matacão de 2m de altura**



**Ex: Migmatito no leito do rio**



**Decomposição esferoidal**



## Pedologia:

| <i>Símbolo do solo</i> | <i>Classe</i>                               | <i>Rocha de origem</i>                                       |
|------------------------|---|--|
| Ca                     | Cambissolo álico                            | Decomposição de Migmatito                                    |
| Cd                     | Cambissolo distrófico                       | Aluviões recentes, sedimentos arenosos, siltosos e argilosos |
| PVa                    | Podzólico                                   | Decomposição de Migmatito, Granito e aluviões recentes       |
| Ra/Ar                  | Litólico álico<br>+<br>afloramento de rocha | Granito e Migmatito  |

*Fonte: NUNES (2002)*



Cambissolo álico com matacão em meio à matriz argilosa

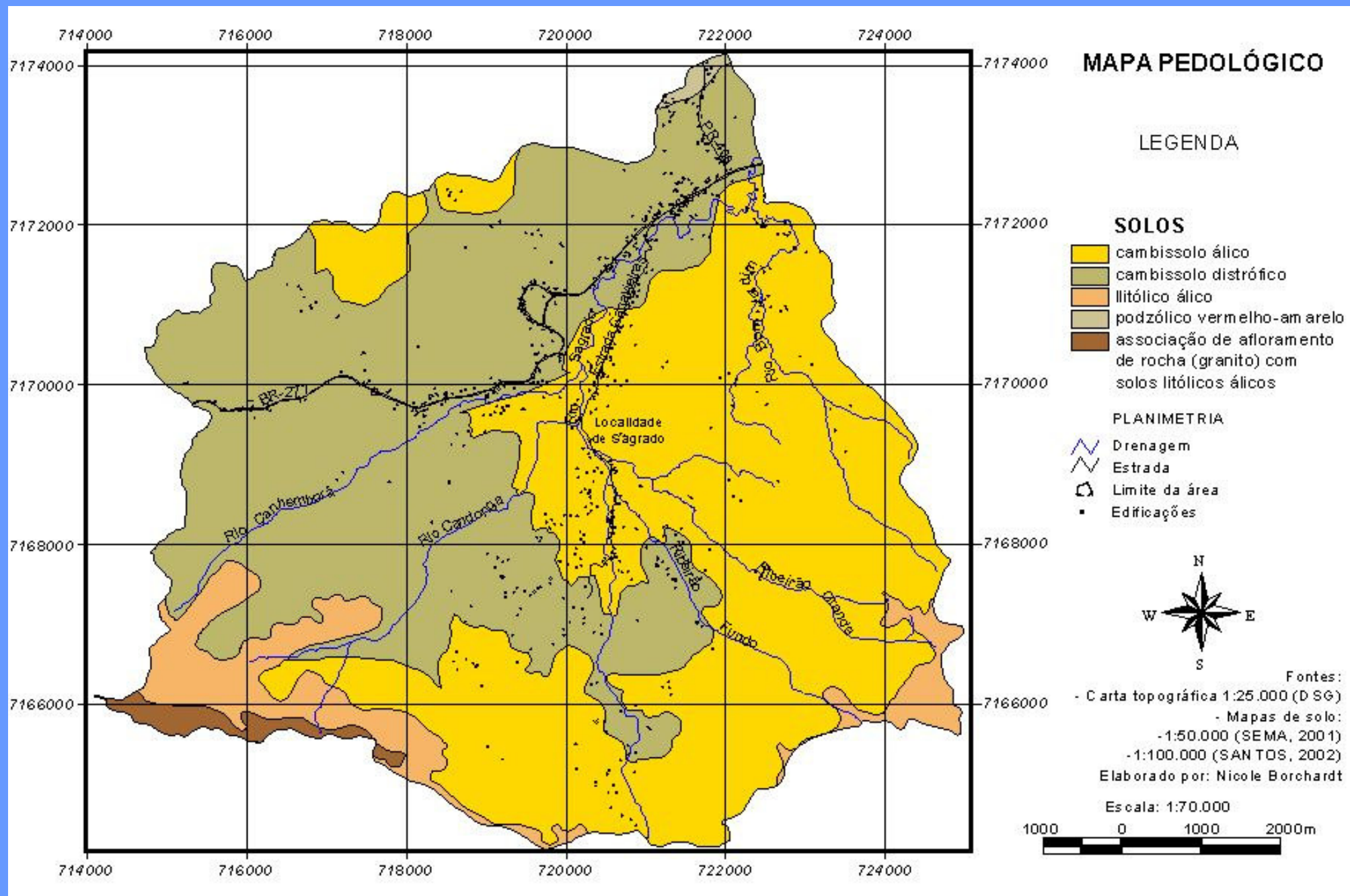



Cambissolo distrófico com sulcos



Podzólico

*Fotos: Nicole Borchardt (2004)*





**Avaliação de movimentos  
de massa  
na área de estudo**

**- Indício de rastejo: árvores inclinadas e encurvada**



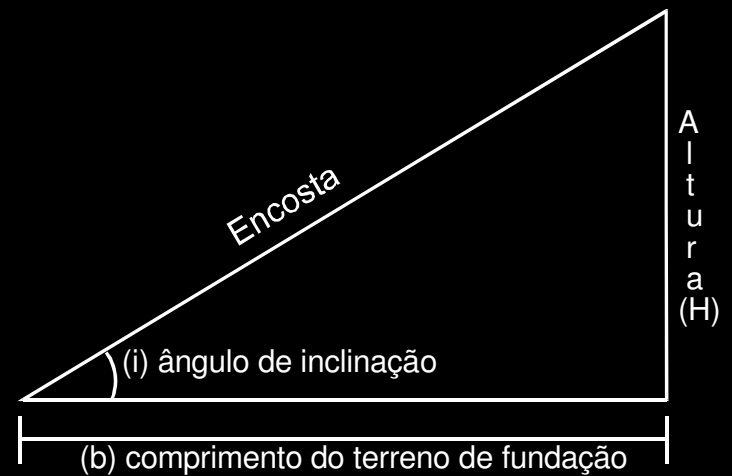
- Pequenas quedas de solo

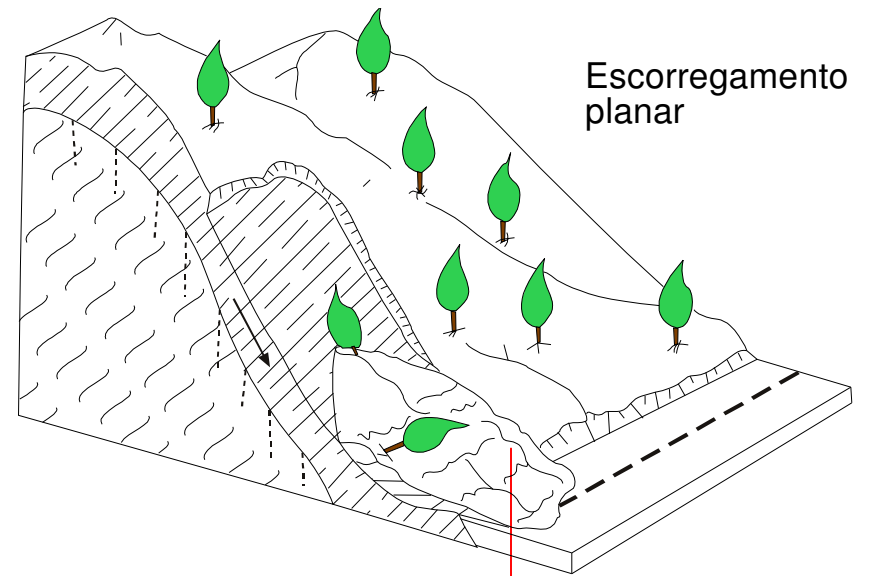
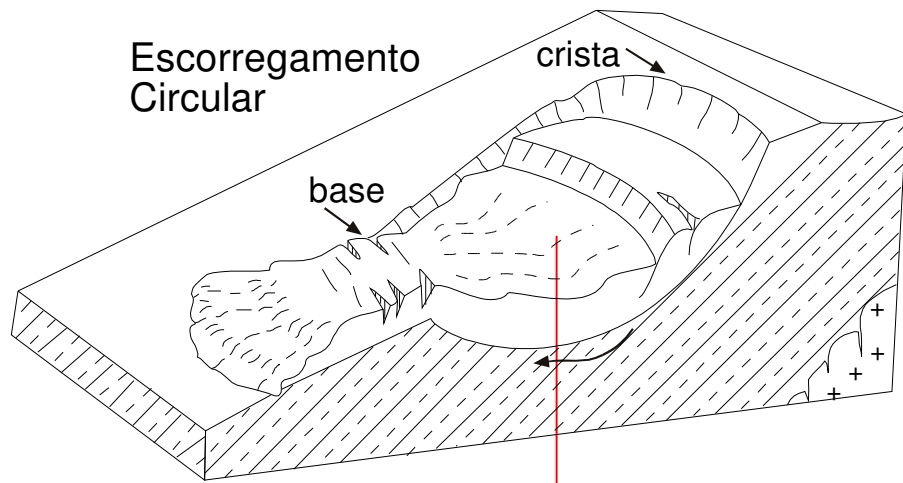


## - Escorregamento

Movimento rápido de massa de solo, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora de um talude.

## - Talude ou Encosta





### Escorregamentos ao longo da BR-277



# Estabilidade de uma encosta sem vegetação

## Forças atuantes:

*Considerando talude infinito composto por solo homogêneo, com percolação de água paralela à superfície de inclinação.*



## Fator de Segurança (FS):

$$FS = \frac{\text{forças resistentes}}{\text{forças solicitantes}}$$

$$\tau = c + \sigma_{ne} \cdot \text{tg} \phi \quad (\text{Lei de Coulomb})$$

$$\sigma_{pe} + \sigma_{se}$$

| <i>FS</i> | <i>ESTABILIDADE DO TALUDE</i> |
|-----------|-------------------------------|
| = 1       | Estabilidade limite           |
| < 1       | Instável                      |
| > 1       | Estável                       |

*\*Departamento Nacional de Estradas de Rodagem:  
FS > 1,5 estável*

## Cálculo de Fator de Segurança:

$$FS = \frac{c + (\gamma_{sat} - \frac{h_2}{Z} \gamma_a) Z \cos^2 i \text{tg} \phi}{Z \gamma_{sat} \text{sen} i \cos i}$$

*Variação da Lei de Coulomb, em FIORI e CARMIGNANI (2001)*

# Estabilidade de uma encosta com vegetação

## Forças acrescentadas:

*Pa = peso das árvores*

*S<sub>r</sub> = contribuição das raízes na coesão*

*F<sub>vento</sub> = força do vento na copa das árvores*

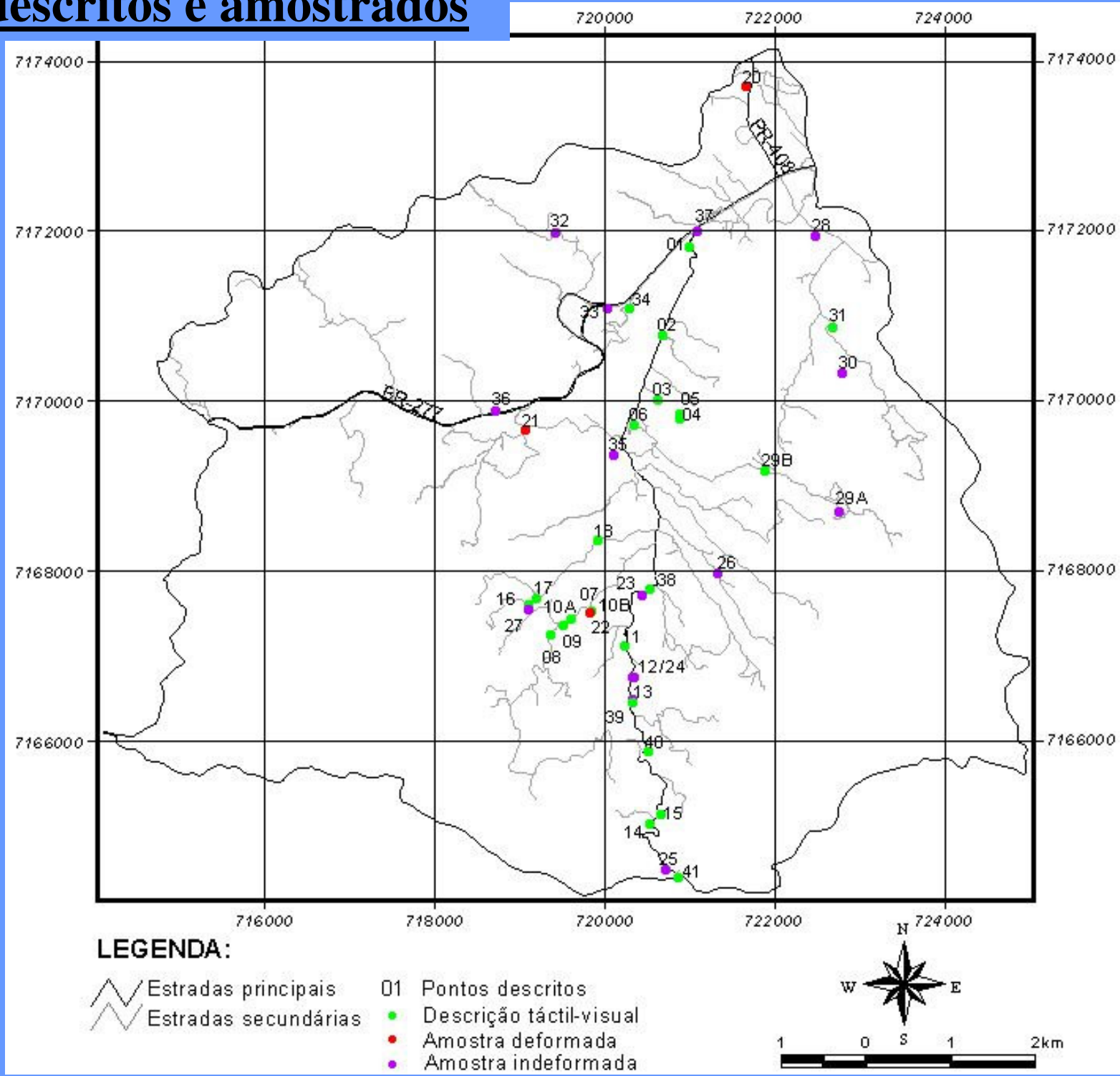
*γ<sub>sub</sub> = peso específico do solo submerso*

## Cálculo de Fator de Segurança:

$$FS = \frac{c + S_r + (h_1 \gamma_{nat} + h_2 \gamma_{sub} + P_a) \cos^2 i \tan \phi}{[(h_1 \gamma_{nat} + h_2 \gamma_{sub} + h_2 \gamma_a + P_a) \sin i + F_{vento}] \cos i}$$

*Variação da Lei de Coulomb, em FIORI e CARMIGNANI (2001)*

# Pontos descritos e amostrados



# Coletas de solos indeformados

**Para ensaio de Cisalhamento Direto:**



**Para ensaio de Permeabilidade:**



# RESULTADOS

## Índice de Plasticidade:

| <i>Índice de Plasticidade</i> | <i>Denominação</i>     |
|-------------------------------|------------------------|
| 7<IP<17                       | Moderadamente plástico |
| 17<IP<35                      | Altamente plástico     |
| IP>35                         | Extremamente plástico  |

## Granulometria:

| <b>Tipo de solo<br/>(EMBRAPA, 1999)</b> | <b>Solos</b> | <b>Símbolo do grupo<br/>(SUCS)</b> | <b>Classificação<br/>(SUCS)</b> |
|---|--------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Cambissolo Álico                        | Finos        | MH ou CH                           | Siltoso ou Argilo-siltoso       |
| Cambissolo Distrófico                   |              | CH                                 | Argiloso                        |
| Podzólico                               |              | CL ou ML                           | Argilo-arenoso ou Silto-arenoso |

## Atributos geotécnicos (coesão e ângulo de atrito interno) determinados em laboratório:

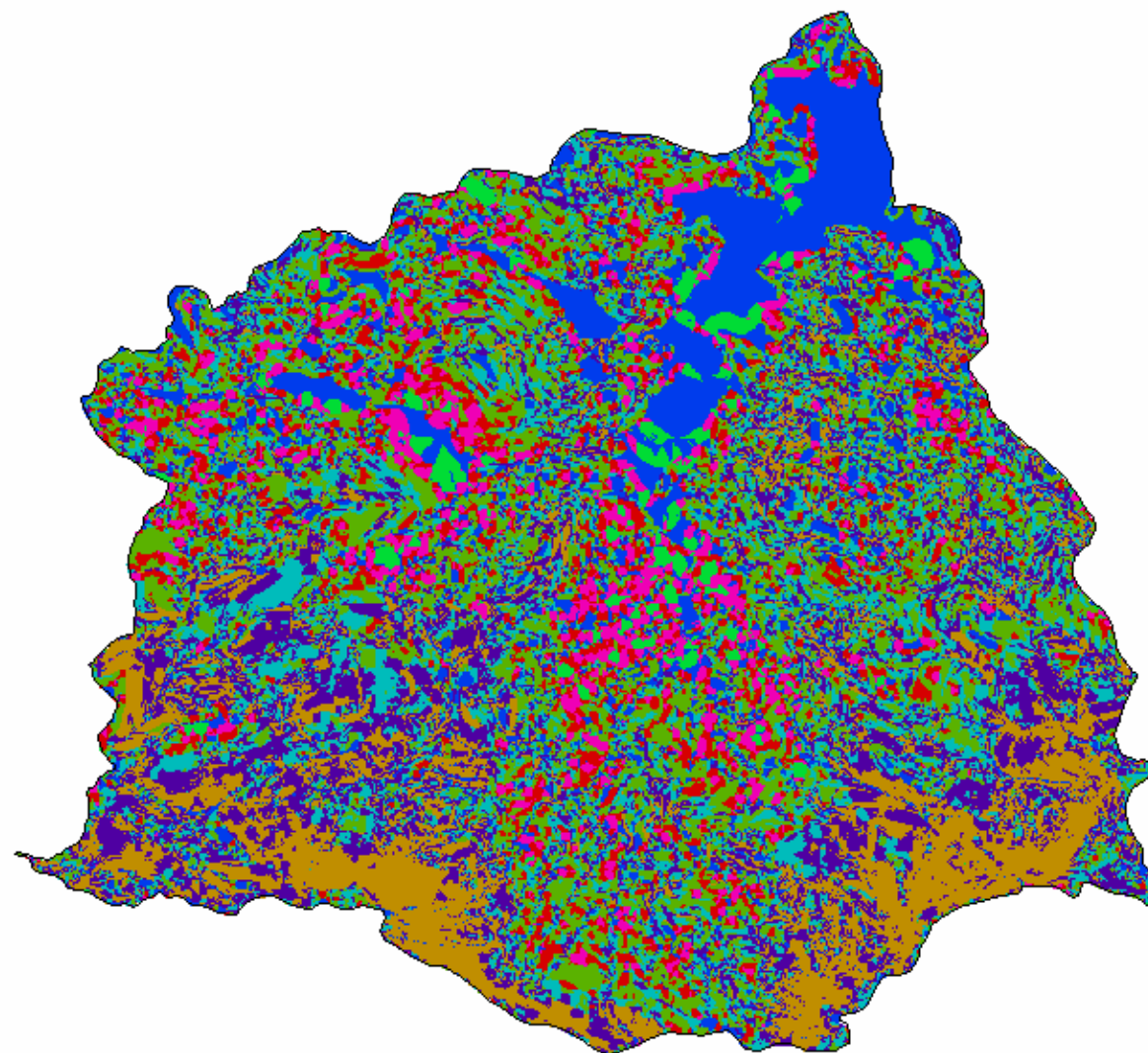
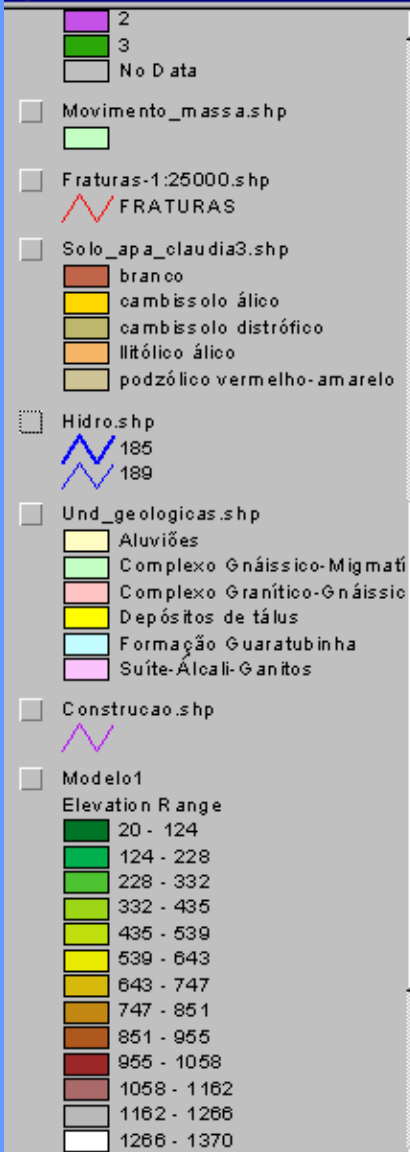
| <i>Tipo de solo<br/>(EMBRAPA, 1999)</i> | <i>c (kPa)</i> | <i><math>\phi</math> (°)</i> | <i>Massa<br/>específica<br/><math>\rho_{nat}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</i> | <i>Peso<br/>específico<br/><math>\gamma_{nat}</math><br/>(kN/m<sup>3</sup>)</i> | <i>Massa e Peso específico<br/>segundo PINTO et al. (1993)</i> |                       |
|---|----------------|------------------------------|--|---|--|-----------------------|
| Podzólico                               | 5,84           | 30,51                        | 1,76   | 17,25   | 1,84g/cm <sup>3</sup>  | 18kN/m <sup>3</sup>   |
| Cambissolo Álico                        | 7,185          | 24,56                        | 1,65   | 16,17   | 1,79g/cm <sup>3</sup>  | 17,6kN/m <sup>3</sup> |
| Cambissolo<br>Distrófico                | 0              | 33,11                        | 1,42   | 13,92   | 1,84g/cm <sup>3</sup>  | 18kN/m <sup>3</sup>   |

# CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS SEGUNDO SUCS

|   | <i>Símbolo do Grupo (SUCS)</i> |             |                       |                       |
|---|--------------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| <i>PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS</i>                     | <i>MH</i>                      | <i>ML</i>   | <i>CH</i>             | <i>CL</i>             |
| <i>Classificação dos solos</i>                      | Silte elástico                 | Silte       | Argila muito plástica | Argila pouco plástica |
| <i>Trabalhabilidade como material de construção</i> | Má                             | Regular     | Má                    | Regular a boa         |
| <i>Permeabilidade quando compactado</i>             | Semipermeável a permeável      |             | Impermeável           |                       |
| <i>Resistência compactada e saturada</i>            | Baixa a regular                | Regular     | Baixa                 | Regular               |
| <i>Compressibilidade compactada e saturada</i>      | Alta                           | Média       | Alta                  | Média                 |
| <i>Peso específico máximo (kN/m<sup>3</sup>)</i>    | 11,0 a 15,0                    | 15,0 a 19,0 | 12,0 a 17,0           | 15,0 a 19,0           |
| <i>Valor como fundação</i>                          | Má                             | Muito má    | Regular a má          | Má a boa              |
| <i>Características de drenagem</i>                  | Regular a má                   |             | Má                    |                       |
| <i>Solo (EMBRAPA, 1999)</i>                         | Ca                             | PVa         | Ca/Cd                 | PVa                   |

# APLICAÇÃO DO MÉTODO COM GEOPROCESSAMENTO

REAL\_1

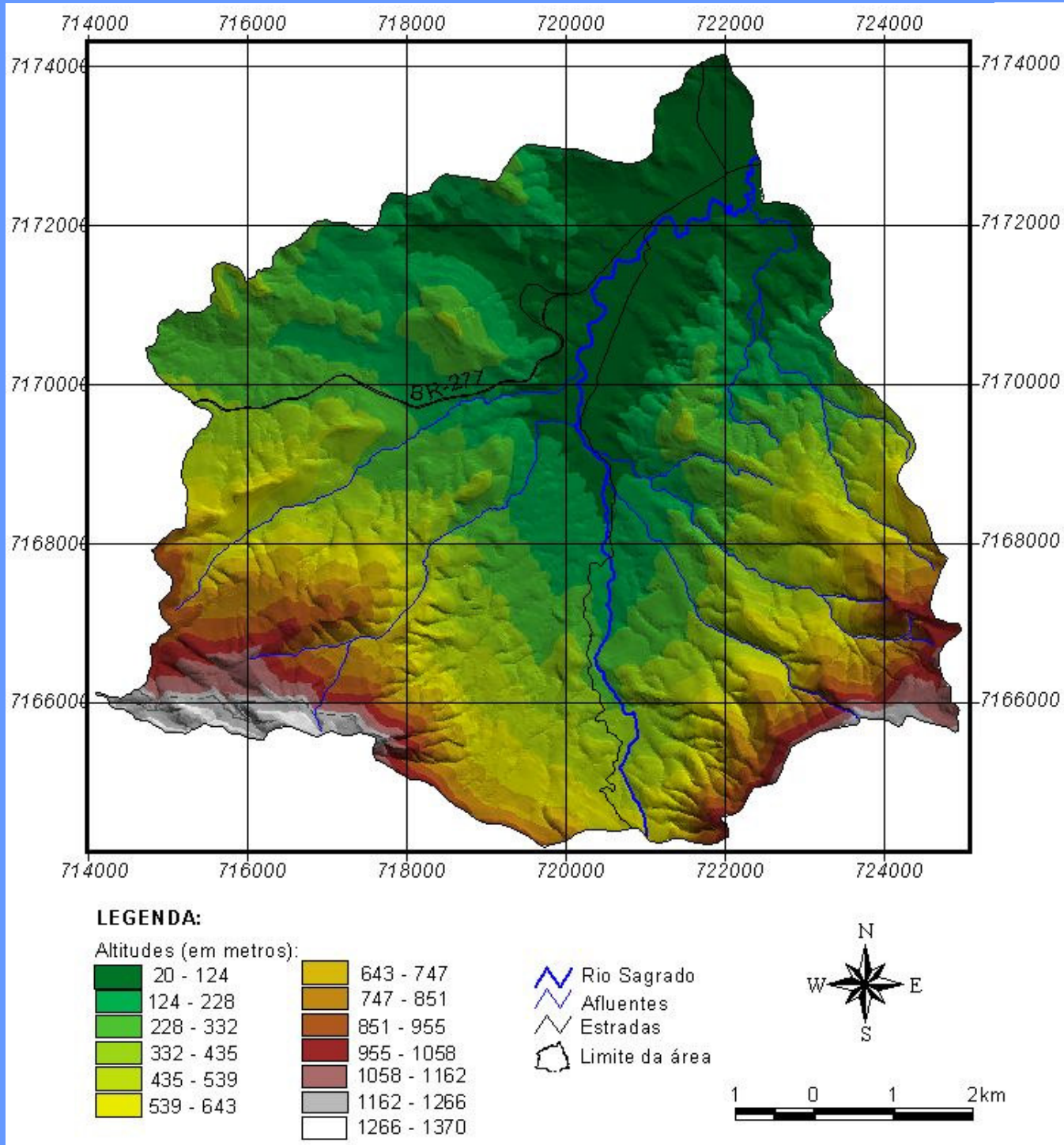


Displays the legends of the active themes

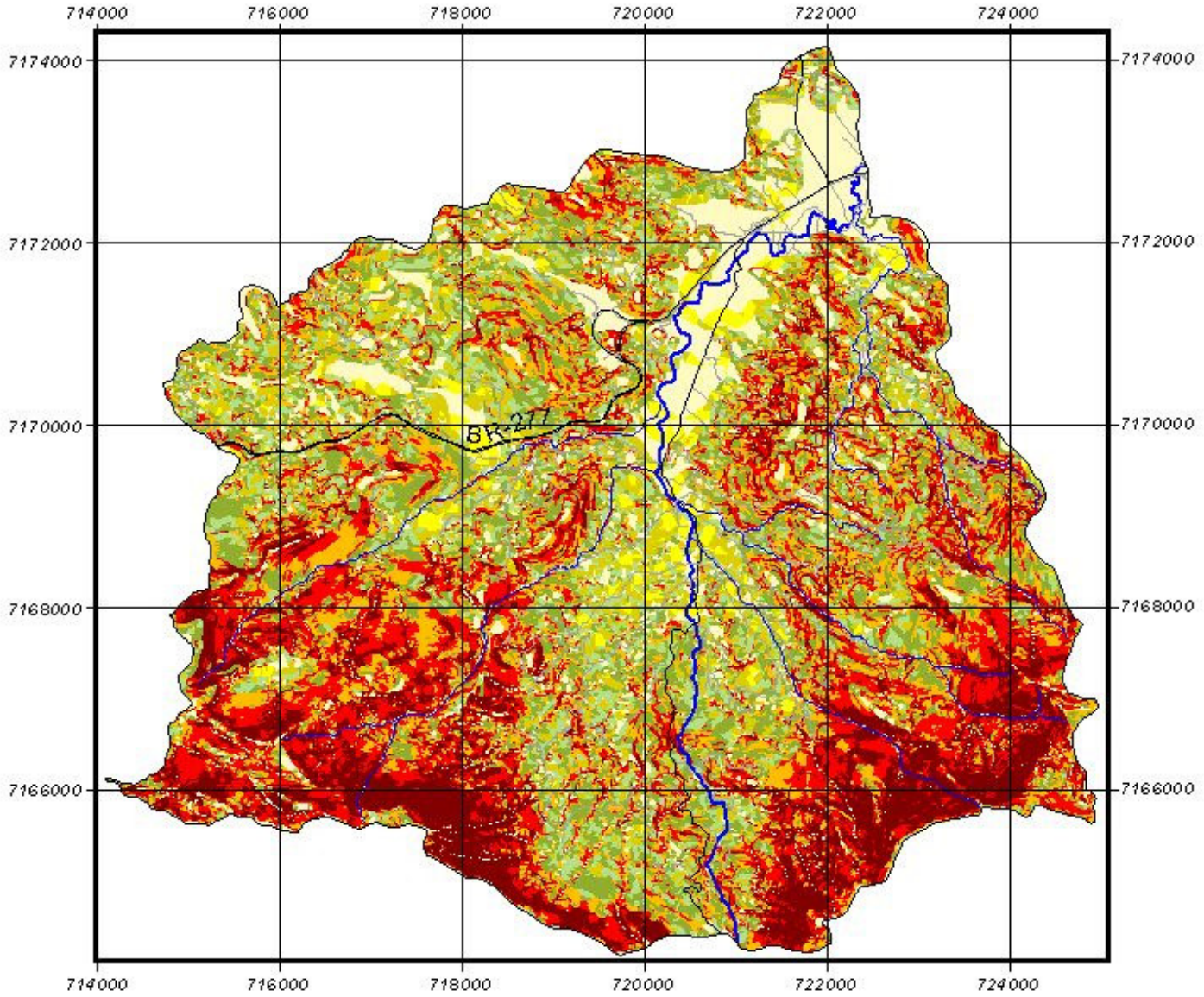
# RETROANÁLISE?

*É a determinação de um atributo geotécnico (neste caso, ângulo de atrito interno) de forma indireta a partir da análise de uma encosta onde o escorregamento já tenha deflagrado, supondo que, no exato momento da ruptura o Fator de Segurança da encosta foi igual a 1 e a coesão nula. A partir deste valor superestimado, determina-se o Fator de Segurança para as demais vertentes da região que possuam características geopedológicas semelhantes.*

# Modelo Digital de Elevação







# Mapa Clinográfico



**LEGENDA:**

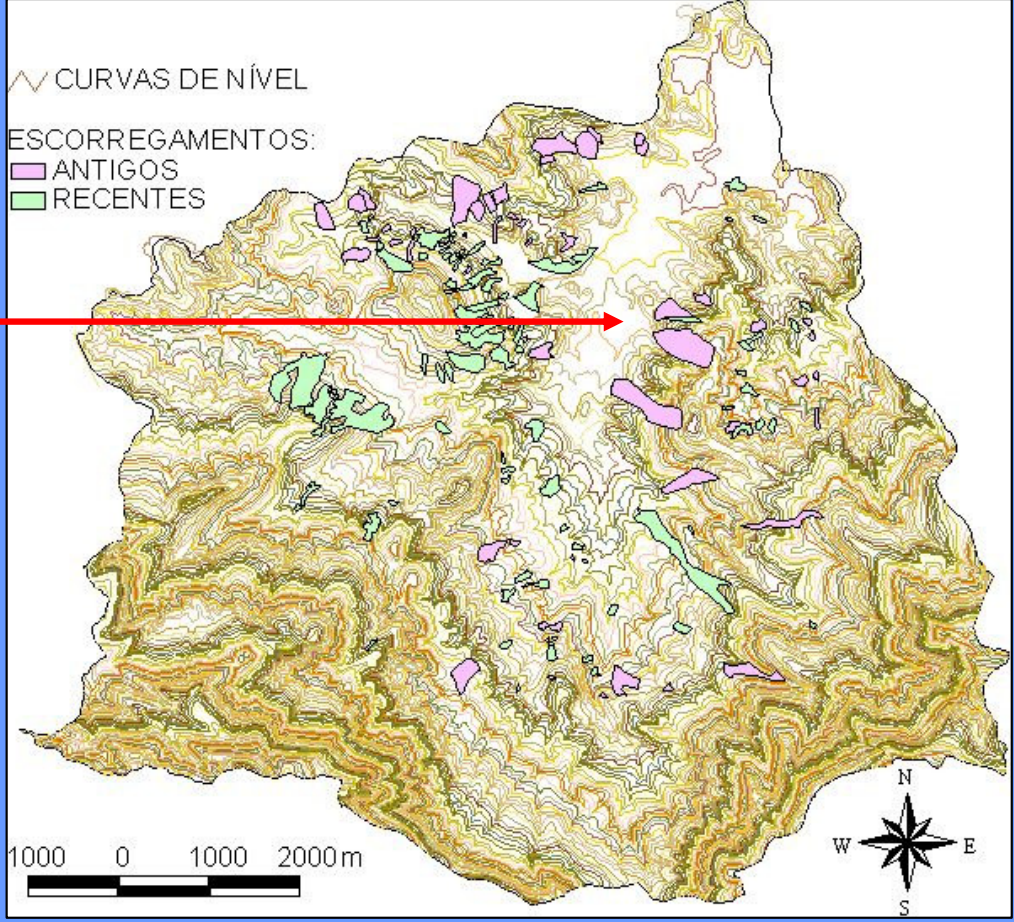
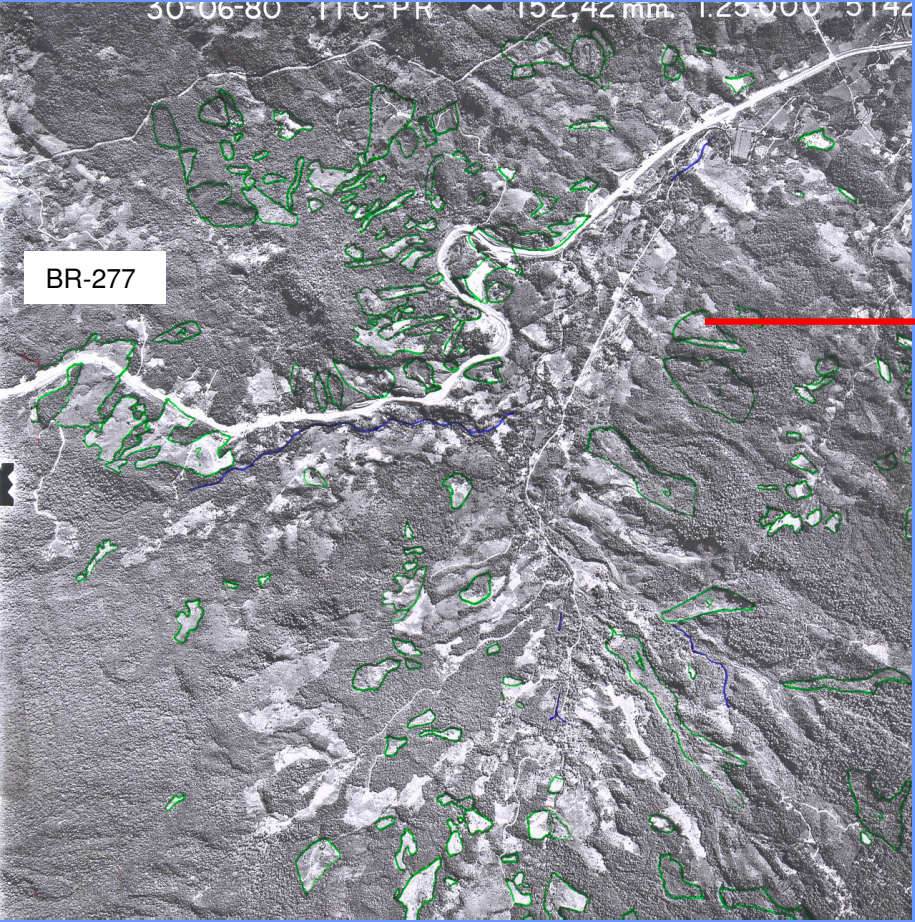
Declividade (intervalo de classes em %):

|   |   |
|---|---|
|  < 5%      |  20% - 30% |
|  5% - 10%  |  30% - 40% |
|  10% - 15% |  40% - 60% |
|  15% - 20% |  > 60%     |

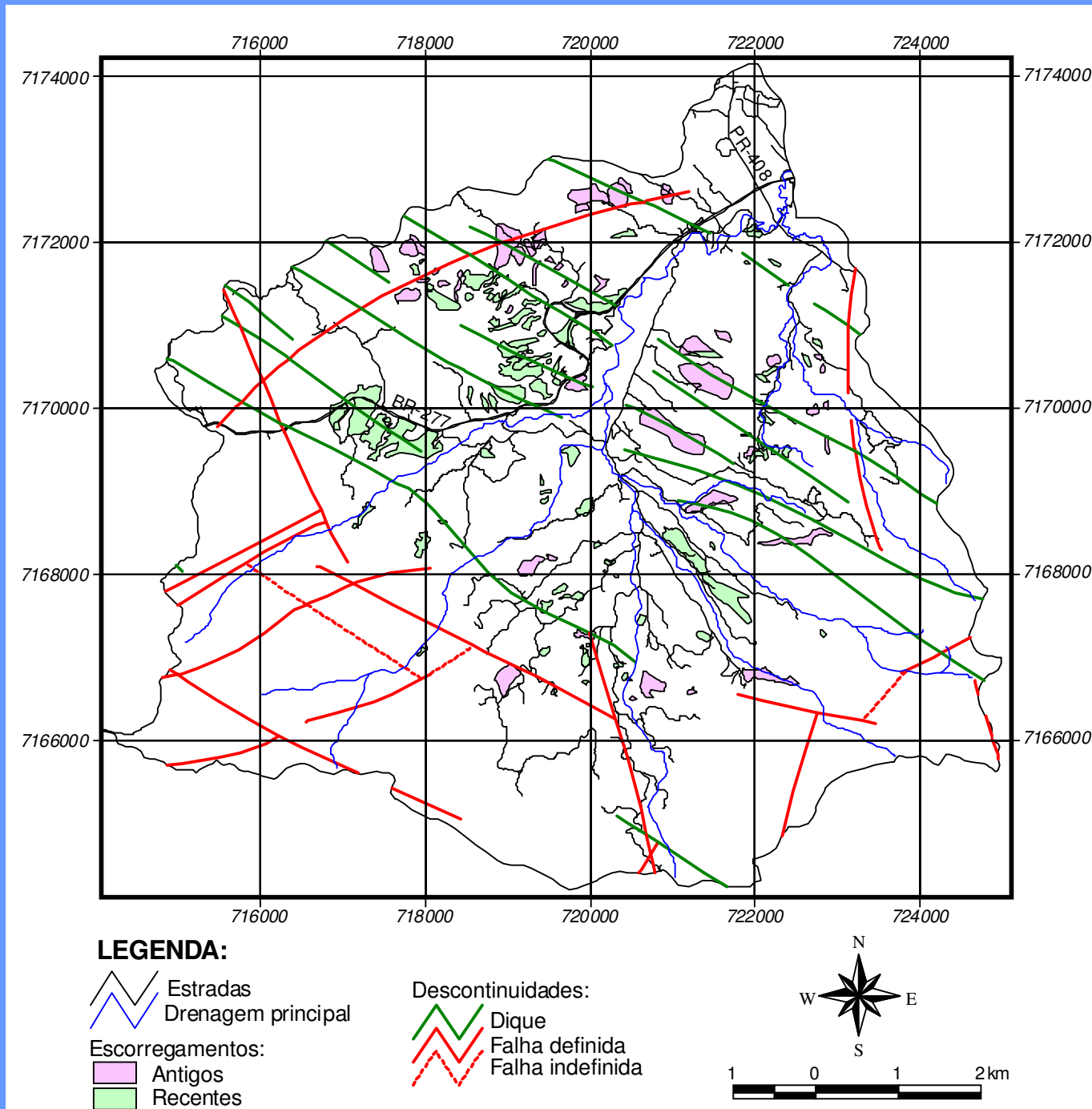
-  Rio Sagrado
-  Afluentes
-  Estradas
-  Limite da área



# Cartografia de escorregamentos



**\*Notório controle estrutural dado pelo alinhamento das feições de escorregamento com as discontinuidades.**



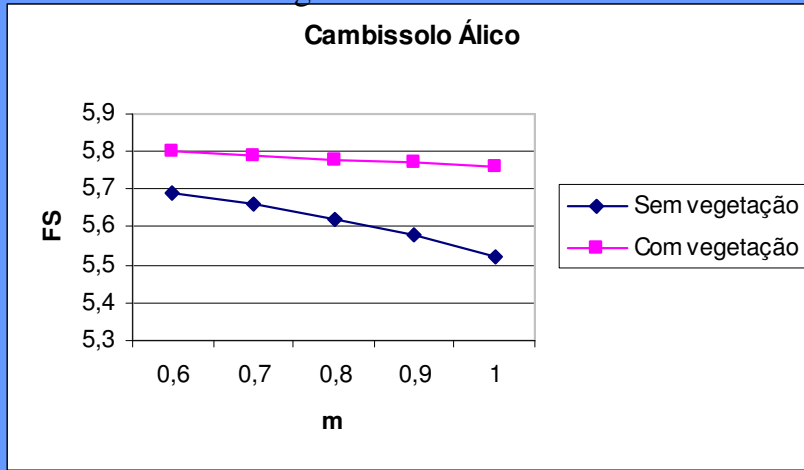


# Valores de ângulo de atrito interno

|                                   |  | <i>M</i><br><i>0,6</i> | <i>M</i><br><i>0,7</i> | <i>M</i><br><i>0,8</i> | <i>M</i><br><i>0,9</i> | <i>M</i><br><i>1,0</i> |
|-----------------------------------|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <i>SOLO</i>                       | <i>Nº. de eixos de escorregamentos</i> | <i>φ médio (°)</i>     |                        |                        |                        |                        |
| <i>Cambissolo álico – Ca</i>      | 68                                     | 23,12                  | 24,88                  | 26,91                  | 29,28                  | 32,07                  |
| <i>Cambissolo distrófico – Cd</i> | 67                                     | 23,08                  | 24,80                  | 26,77                  | 29,06                  | 31,74                  |
| <i>Podzólico - PVa</i>            | 69                                     | 20,55                  | 22,16                  | 24,02                  | 26,20                  | 28,78                  |
| <i>Média total =</i>              |  | <b>22,25</b>           | <b>23,95</b>           | <b>25,90</b>           | <b>28,18</b>           | <b>30,86</b>           |

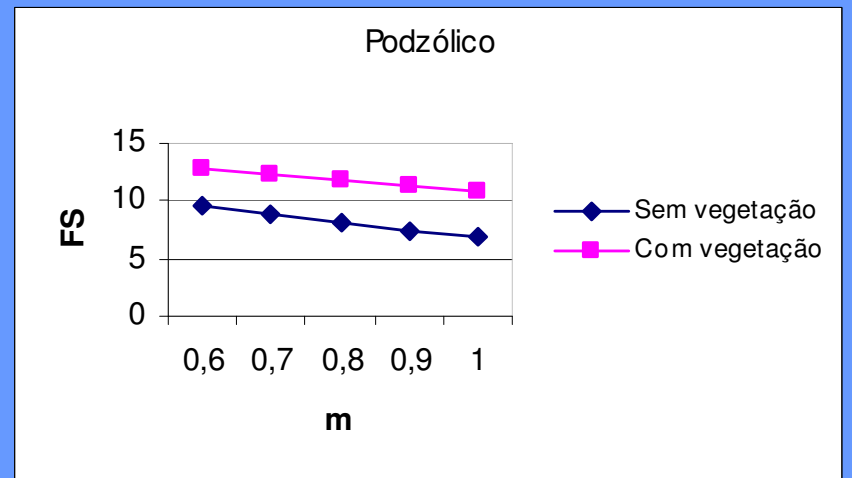
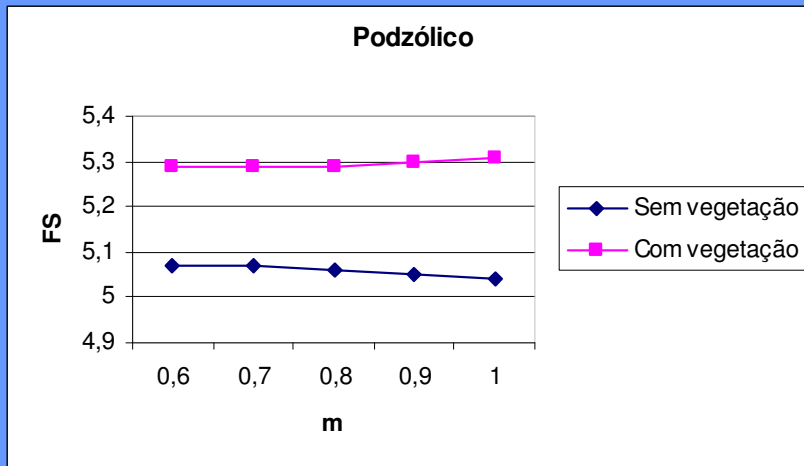
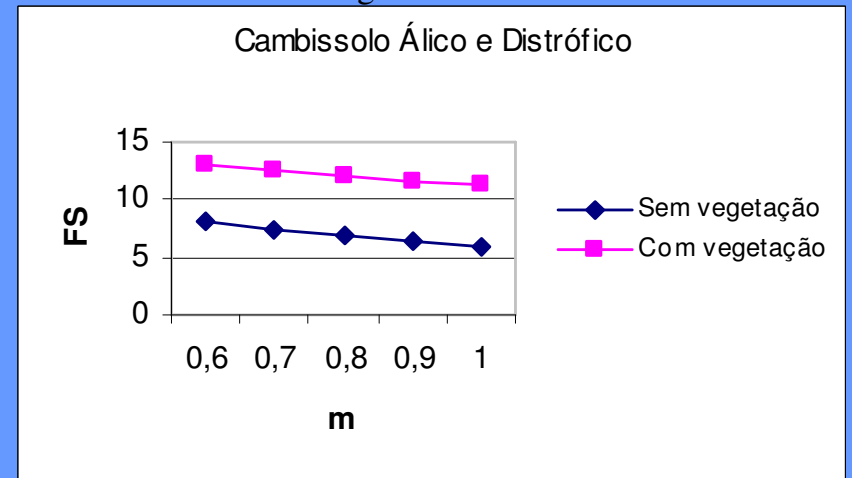
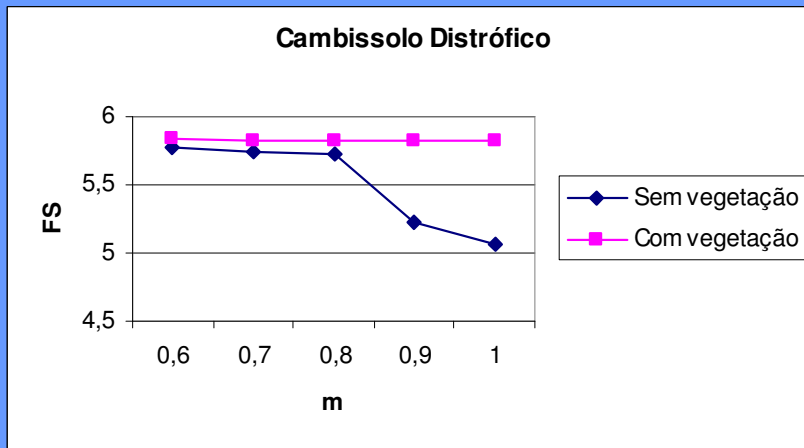
# Comparação dos Fatores de Segurança determinados com atributos retroanalizados e reais

Atributos geotécnicos retroanalizados



\*Considerou-se declividade de 5%

Atributos geotécnicos reais



# Geração de matriz pela soma dos pesos atribuídos a cada tipo de solo e para cada intervalo de declividade proposto



| <i>TIPO DE SOLO</i>               | <i>PESOS</i> |
|-----------------------------------|--------------|
| solos litólicos álicos + afloram. | 0            |
| cambissolo álico - Ca             | 1            |
| cambissolo distrófico - Cd        | 2            |
| podzólico - PVa                   | 3            |

+

| <i>Classificação</i> |                 |              |
|----------------------|-----------------|--------------|
| <i>Inclinação</i>    |                 |              |
| <i>%</i>             | <i>(°)</i>      | <i>PESOS</i> |
| 0% – 5%              | 0 – 2,85°       | 10           |
| 5% – 10%             | 2,85° – 5,70°   | 20           |
| 10% – 15%            | 5,70° – 8,51°   | 30           |
| 15% – 20%            | 8,51° – 11,30°  | 40           |
| 20% – 30%            | 11,30° – 16,70° | 50           |
| 30% – 40%            | 16,70° – 21,80° | 60           |
| 40% – 60%            | 21,80° – 30,95° | 70           |
| > 60%                | > 30,95°        | 80           |

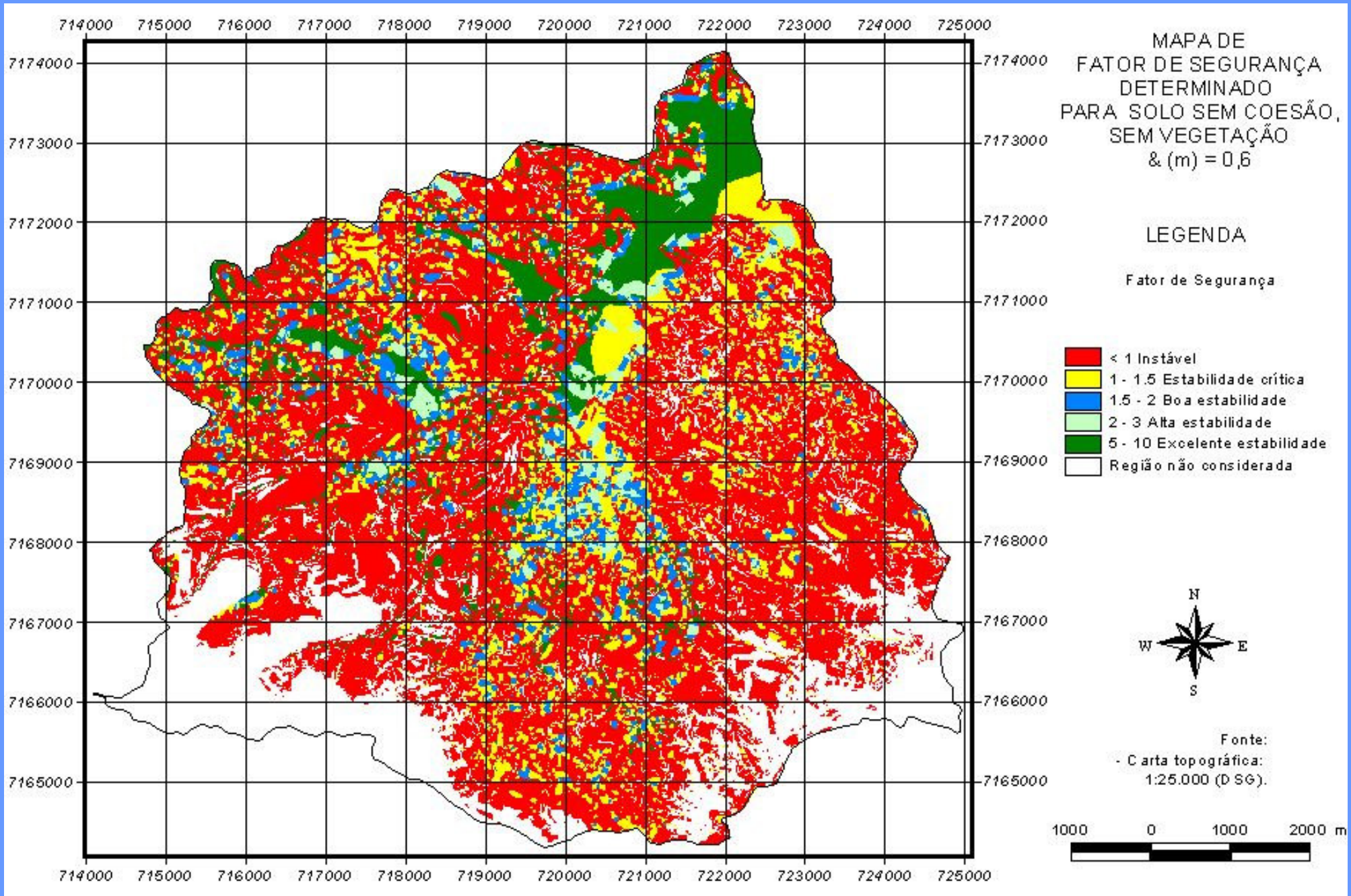
=

| <i>Tipos de solos</i>           |              | <i>PESOS</i> |          |          |          |    |
|---------------------------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|----|
| <i>Intervalo de Declividade</i> |              | <b>0</b>     | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> |    |
| <b>&lt; 5%</b>                  | <b>PESOS</b> | <b>10</b>    | 10       | 11       | 12       | 13 |
| <b>5% – 10%</b>                 |              | <b>20</b>    | 20       | 21       | 22       | 23 |
| <b>10% – 15%</b>                |              | <b>30</b>    | 30       | 31       | 32       | 33 |
| <b>15% – 20%</b>                |              | <b>40</b>    | 40       | 41       | 42       | 43 |
| <b>20% – 30%</b>                |              | <b>50</b>    | 50       | 51       | 52       | 53 |
| <b>30% – 40%</b>                |              | <b>60</b>    | 60       | 61       | 62       | 63 |
| <b>40% – 60%</b>                |              | <b>70</b>    | 70       | 71       | 72       | 73 |
| <b>&gt; 60%</b>                 |              | <b>80</b>    | 80       | 81       | 82       | 83 |

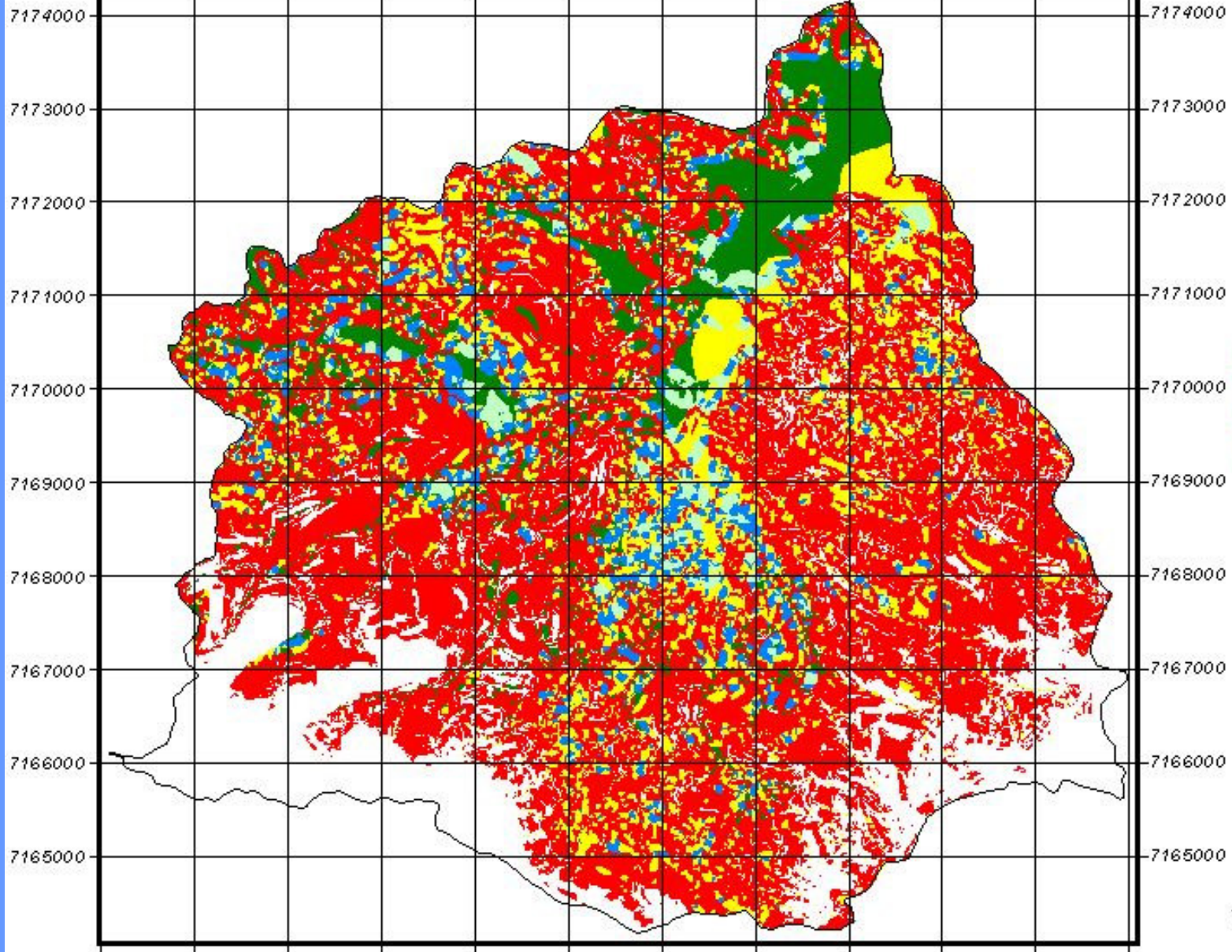
Ex. “71” = cambissolo álico com inclinação entre 40% - 60%  
 “00” = desconsiderados

# Atribuição dos valores de Fator de Segurança à combinação numérica referente e determinação de classe

| <i>INTERVALOS DE FS</i> | <i>CLASSES</i> | <i>DIAGNÓSTICO</i>     |
|-------------------------|----------------|------------------------|
| FS=0                    | 1              | Instabilidade          |
| 0<FS<1                  | 2              |                        |
| 1≤FS<1,5                | 3              | Estabilidade crítica   |
| 1,5≤FS<2                | 4              | Boa estabilidade       |
| 2≤FS<3                  | 5              | Alta estabilidade      |
| 3≤FS<4                  | 6              | Excelente estabilidade |
| 4≤FS<5                  | 7              |                        |
| 5≤FS<10                 | 8              |                        |
| 10≤FS<100               | 9              |                        |
| FS≥100                  | 10             |                        |

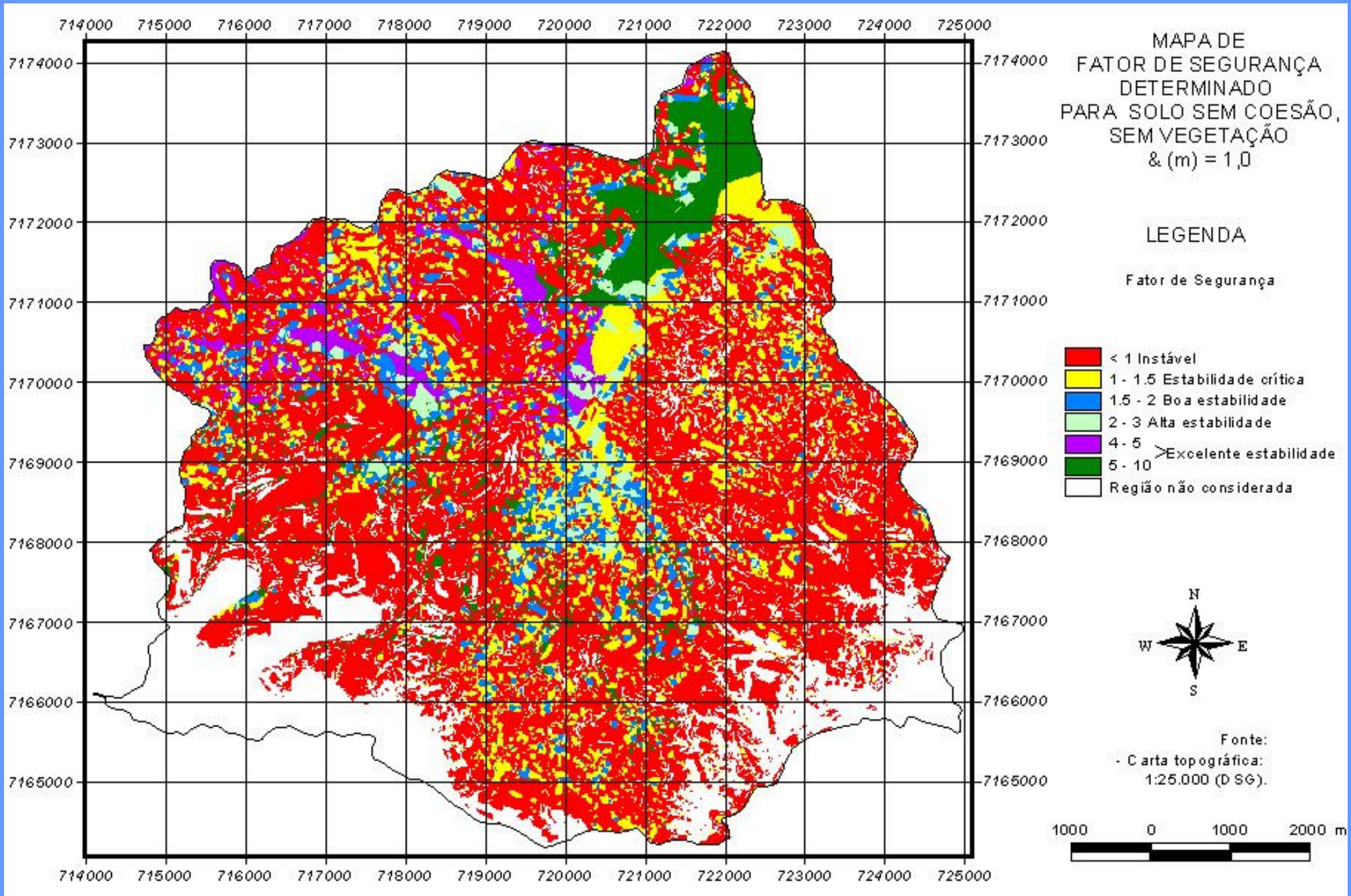


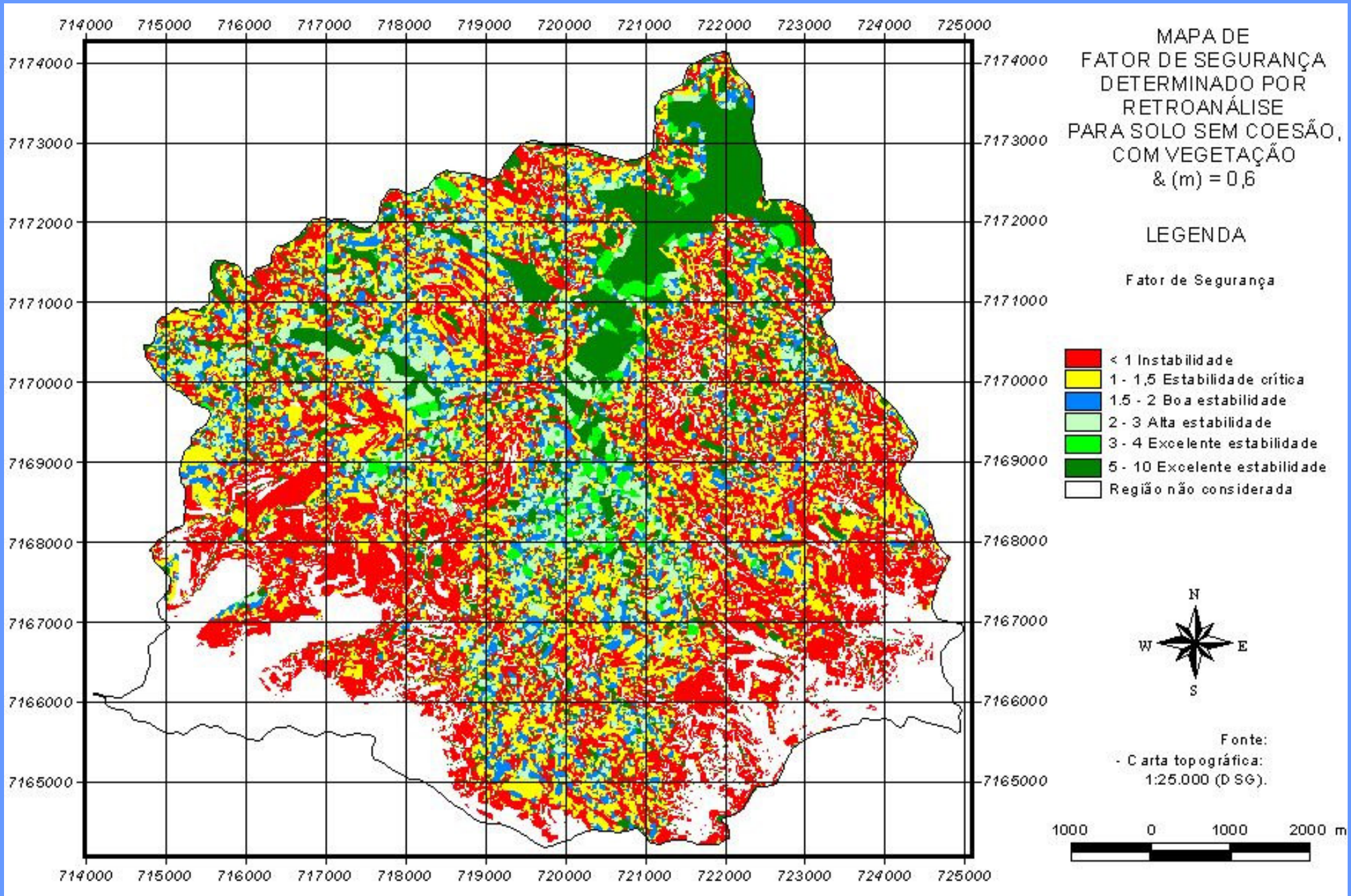
714000 715000 716000 717000 718000 719000 720000 721000 722000 723000 724000 725000

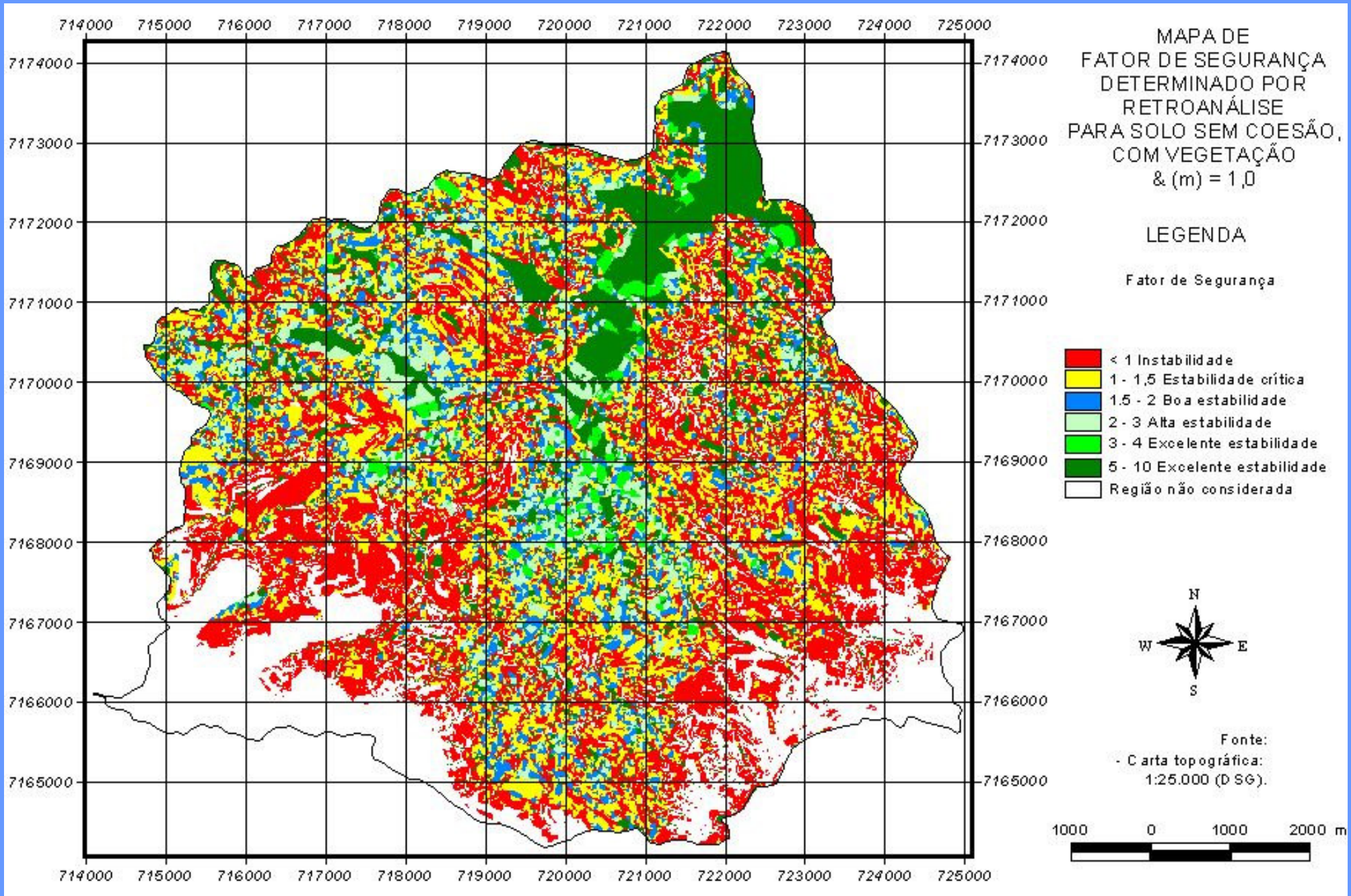


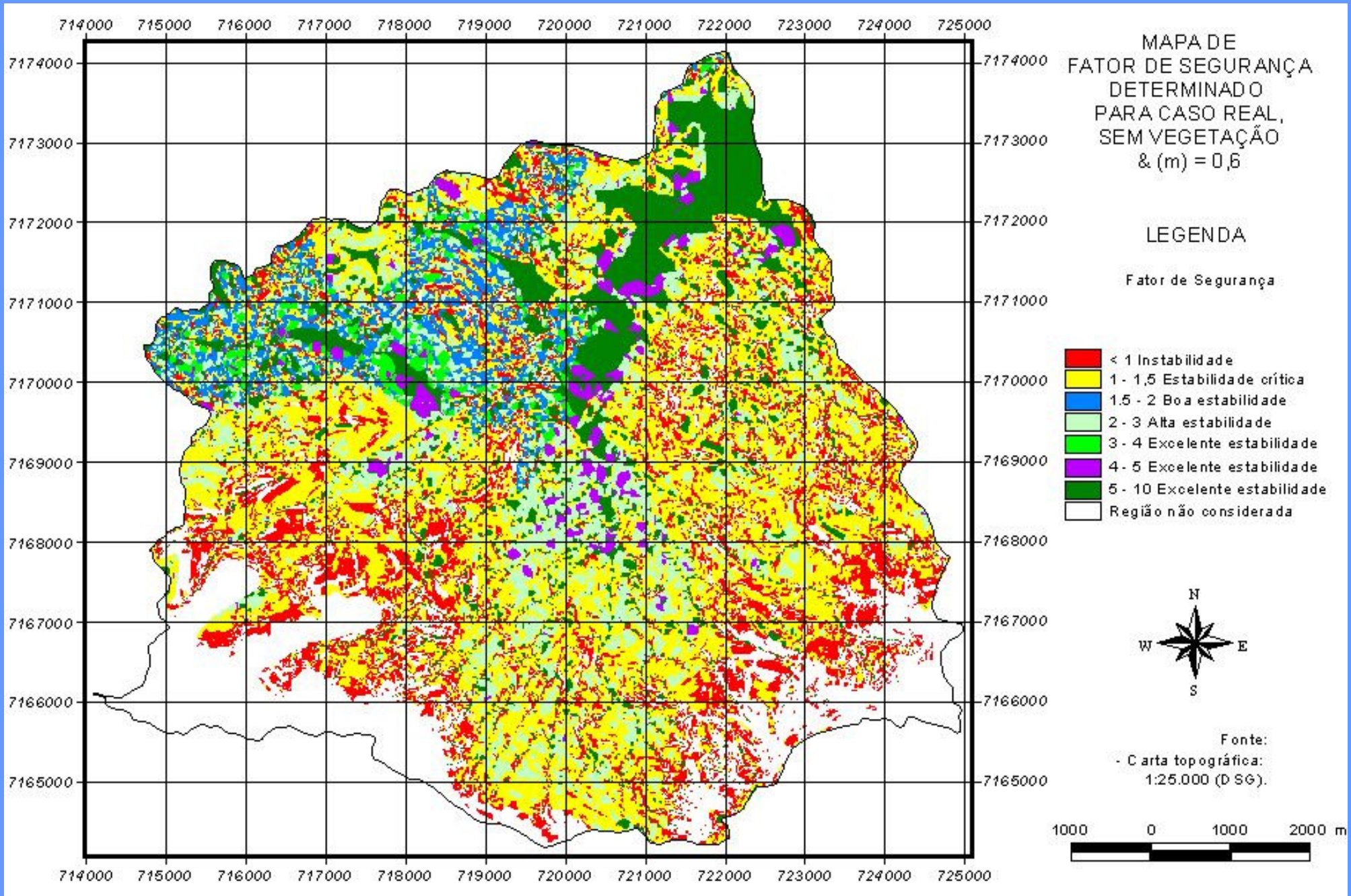
7174000  
7173000  
7172000  
7171000  
7170000  
7169000  
7168000  
7167000  
7166000  
7165000

714000 715000 716000 717000 718000 719000 720000 721000 722000 723000 724000 725000

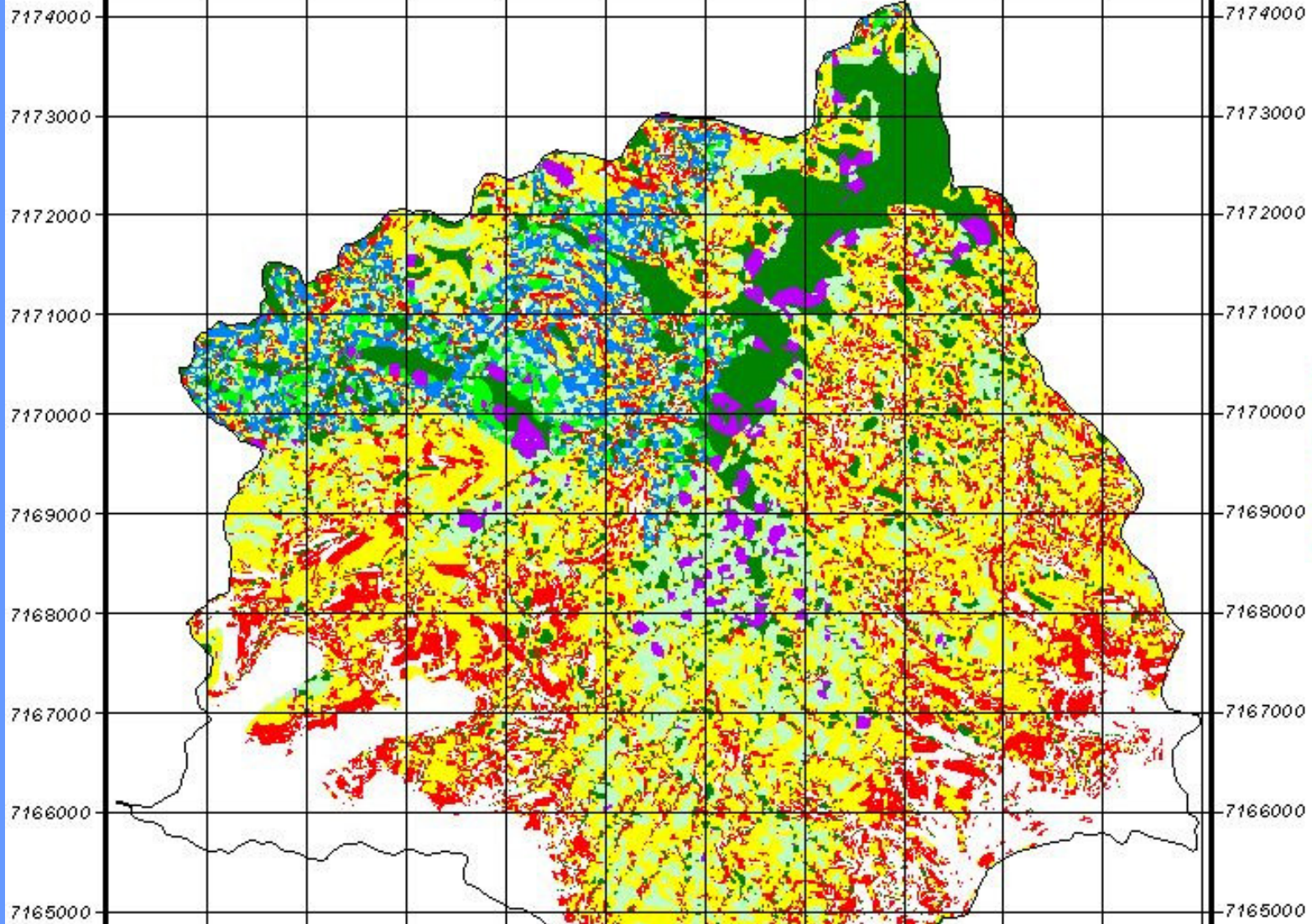






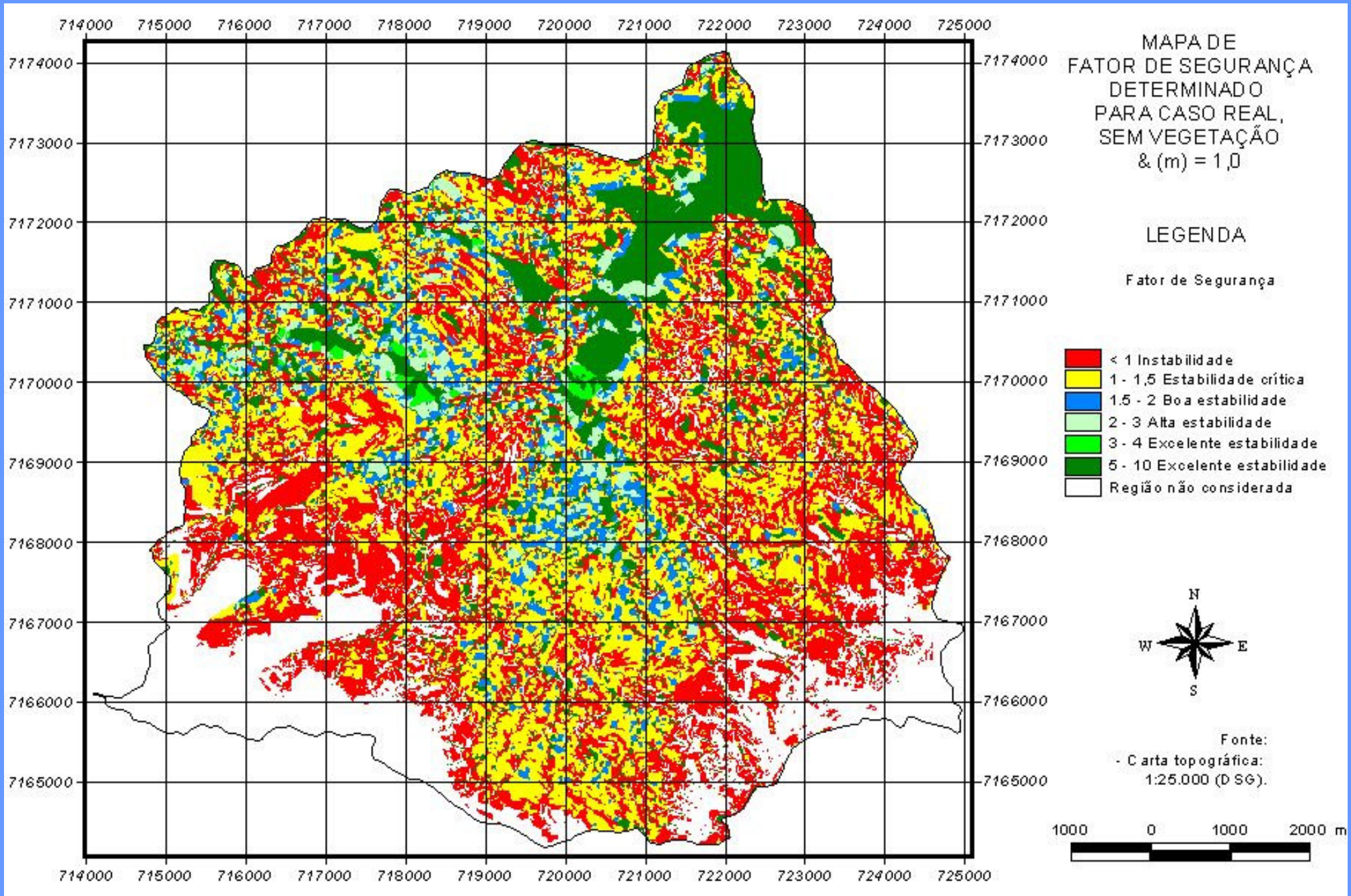


714000 715000 716000 717000 718000 719000 720000 721000 722000 723000 724000 725000

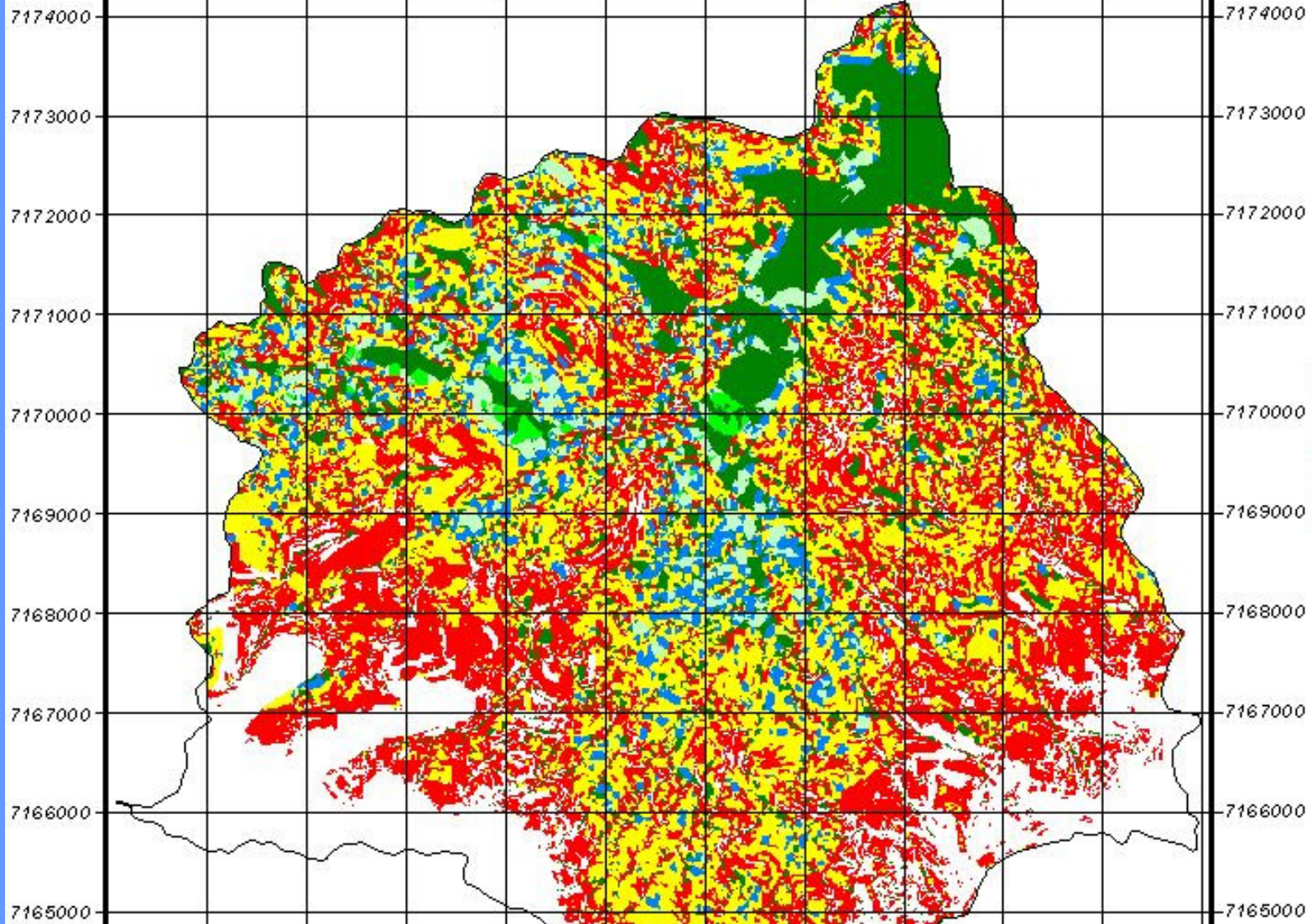


7174000  
7173000  
7172000  
7171000  
7170000  
7169000  
7168000  
7167000  
7166000  
7165000

714000 715000 716000 717000 718000 719000 720000 721000 722000 723000 724000 725000



714000 715000 716000 717000 718000 719000 720000 721000 722000 723000 724000 725000

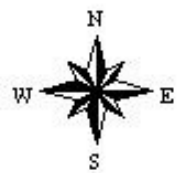


MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA CASO REAL, SEM VEGETAÇÃO & (m) = 1,0

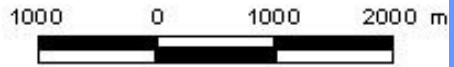
**LEGENDA**

Fator de Segurança

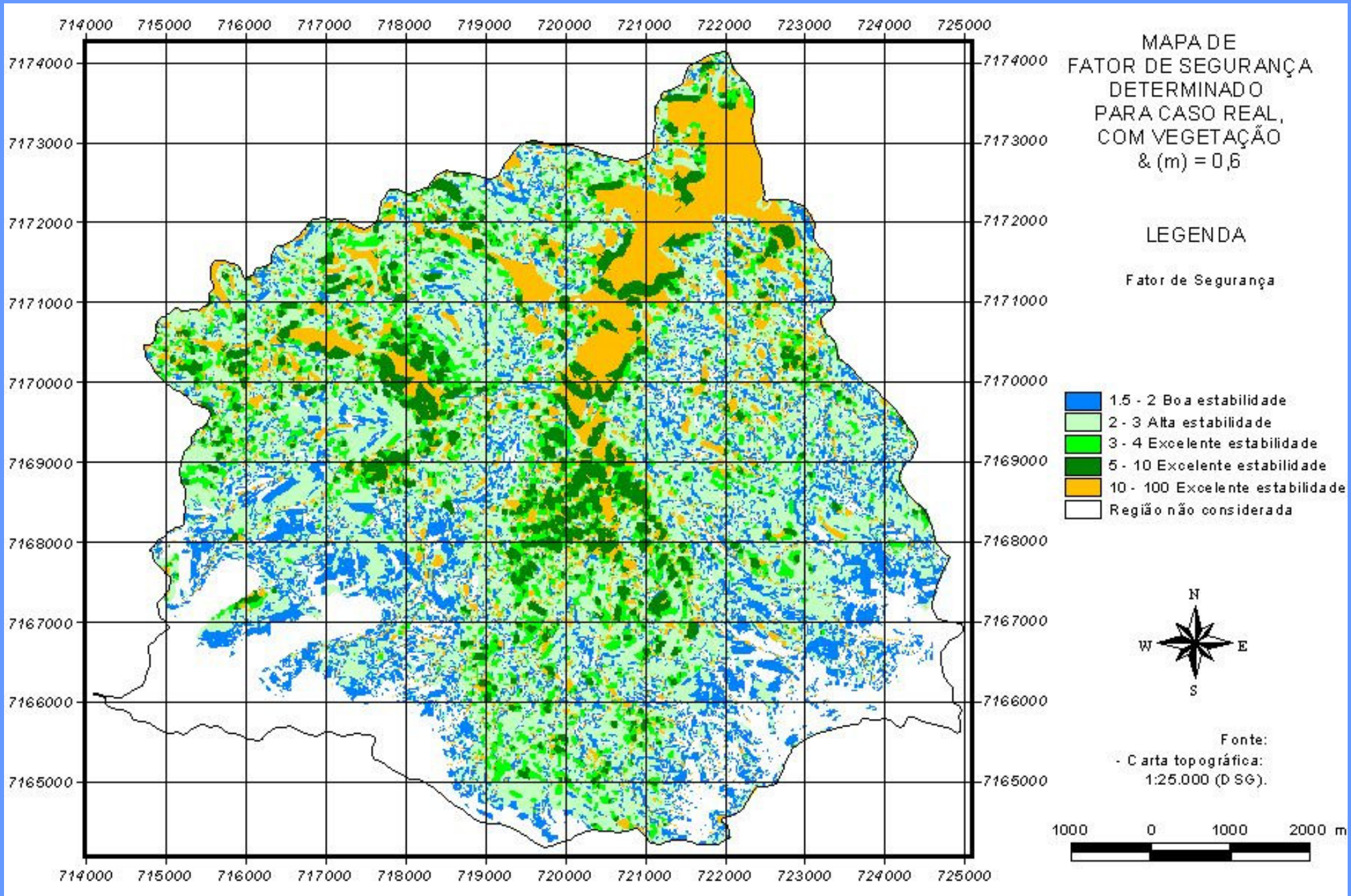
- < 1 Instabilidade
- 1 - 1,5 Estabilidade crítica
- 1,5 - 2 Boa estabilidade
- 2 - 3 Alta estabilidade
- 3 - 4 Excelente estabilidade
- 5 - 10 Excelente estabilidade
- Região não considerada



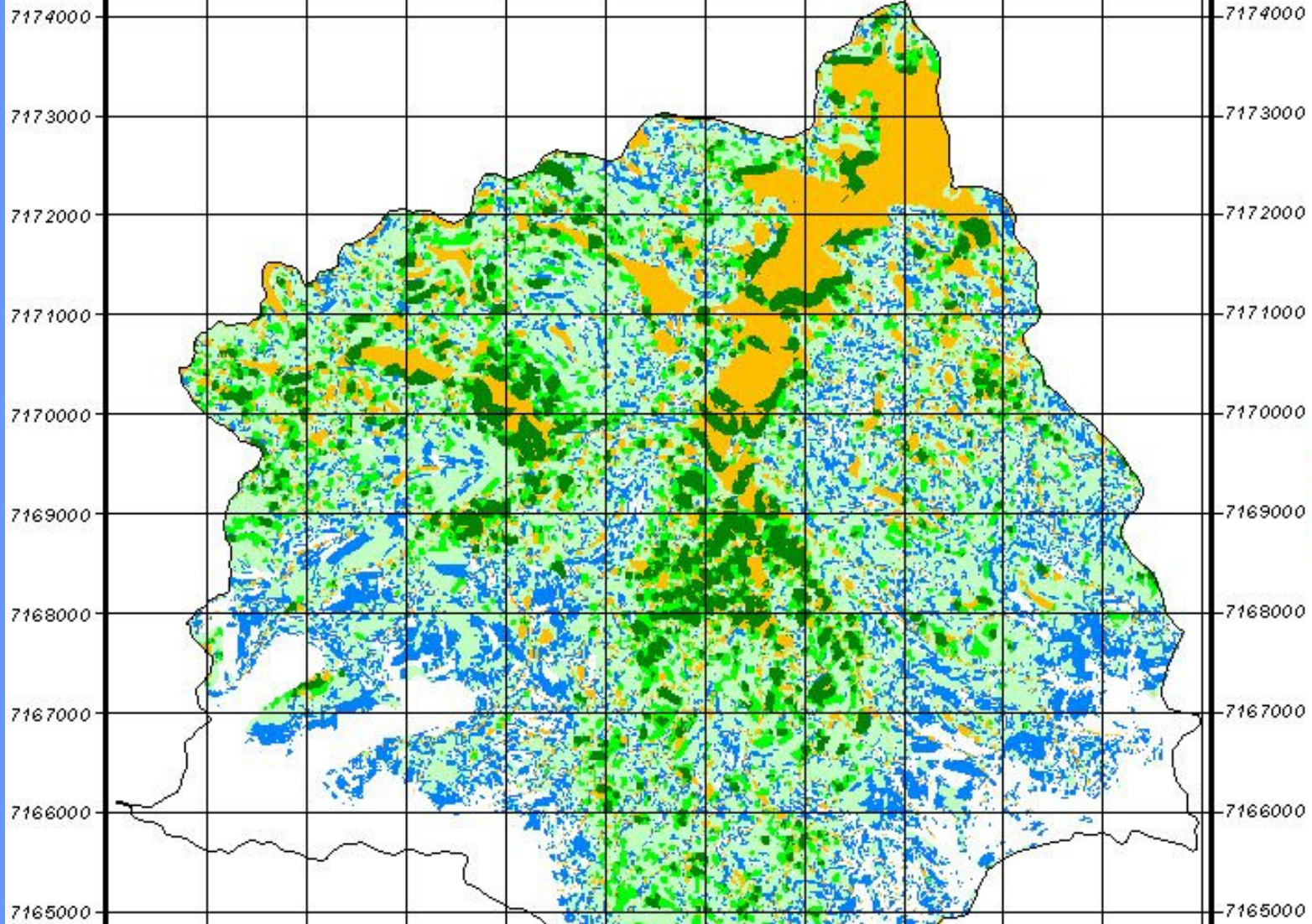
Fonte:  
- Carta topográfica: 1:25.000 (D SG).



714000 715000 716000 717000 718000 719000 720000 721000 722000 723000 724000 725000

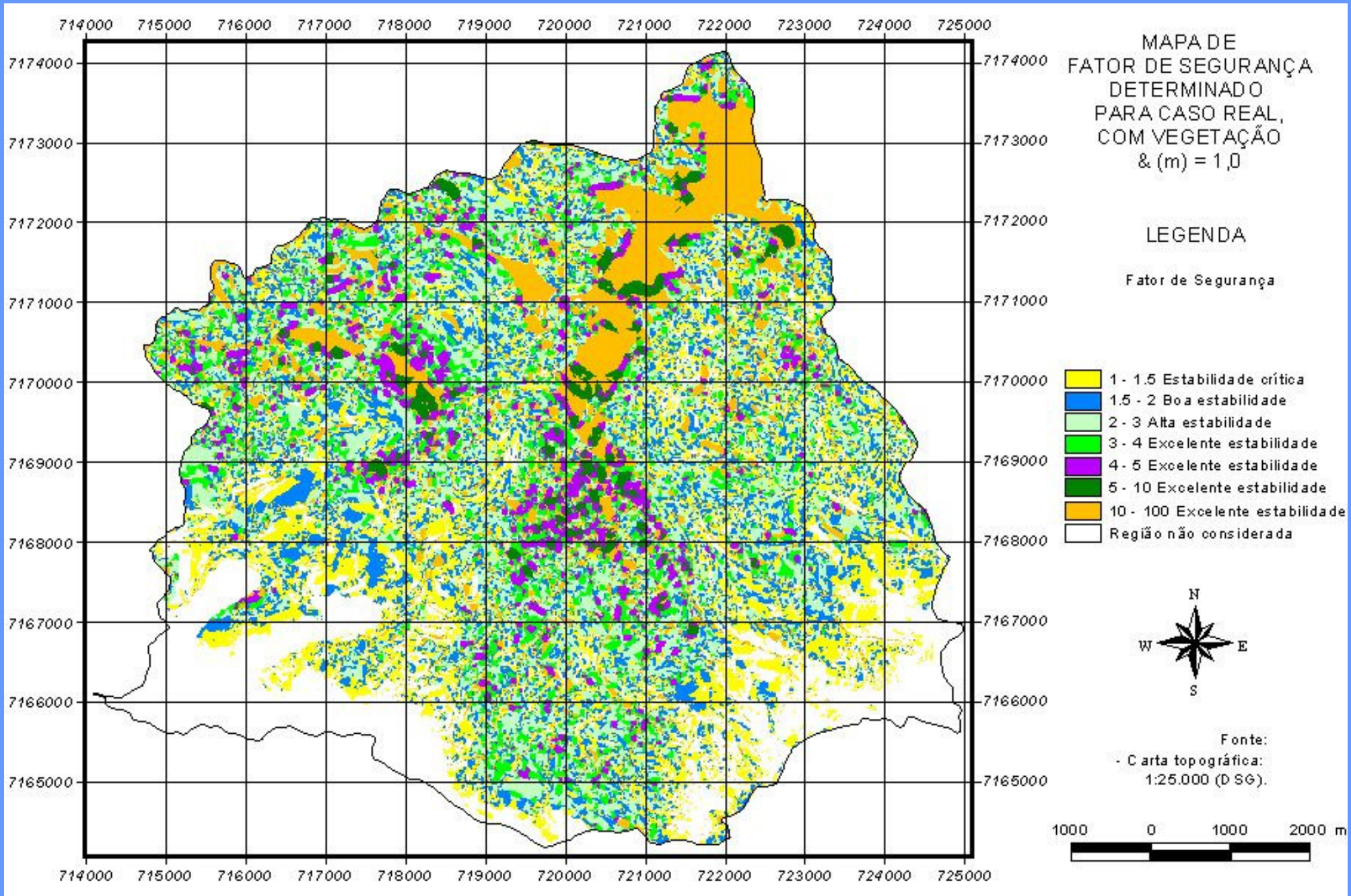


714000 715000 716000 717000 718000 719000 720000 721000 722000 723000 724000 725000



7174000  
7173000  
7172000  
7171000  
7170000  
7169000  
7168000  
7167000  
7166000  
7165000

714000 715000 716000 717000 718000 719000 720000 721000 722000 723000 724000 725000



# CONCLUSÕES

**Um mapa de Fator de Segurança é bastante útil para a tomada de decisões no tocante ao planejamento territorial.**

**A vegetação contribui favoravelmente à contenção das encostas.**

**A maior estabilidade nas encostas está em declividades abaixo de 15%.**

**A classificação geotécnica dos solos atesta a baixa estabilidade da região.**

**A desconsideração da coesão revela casos hipotéticos de saturação plena ou a presença de um solo composto por 100% de areia, onde os valores de Fator de Segurança são subestimados ao extremo. O resultado não é real, por isso deve-se ter maior cautela ao “ler” os mapas com coesão nula.**

**Eficácia do método é comprovada pela semelhança entre os valores de ângulo de atrito Interno determinados por retroanálise com aqueles determinados em laboratório.**

**Os escorregamentos do tipo translacional, ou planar, estão relacionados a solos mais argilosos, Enquanto os demais movimentos de massa observados em campo estão ligados a solos siltosos.**

**Solos da região são essencialmente finos, com comportamento não favorável à implantação de estradas.**

**“ ... então, contemplei toda a obra de Deus e vi que o homem não pode compreender a obra que se faz debaixo do sol;**



**pois por mais que o homem trabalhe para a descobrir, não a entenderá; e, ainda que diga o sábio que a virá a conhecer, nem por isso a poderá achar.”**

**Eclesiastes 8:17**



**OBRIGADA**

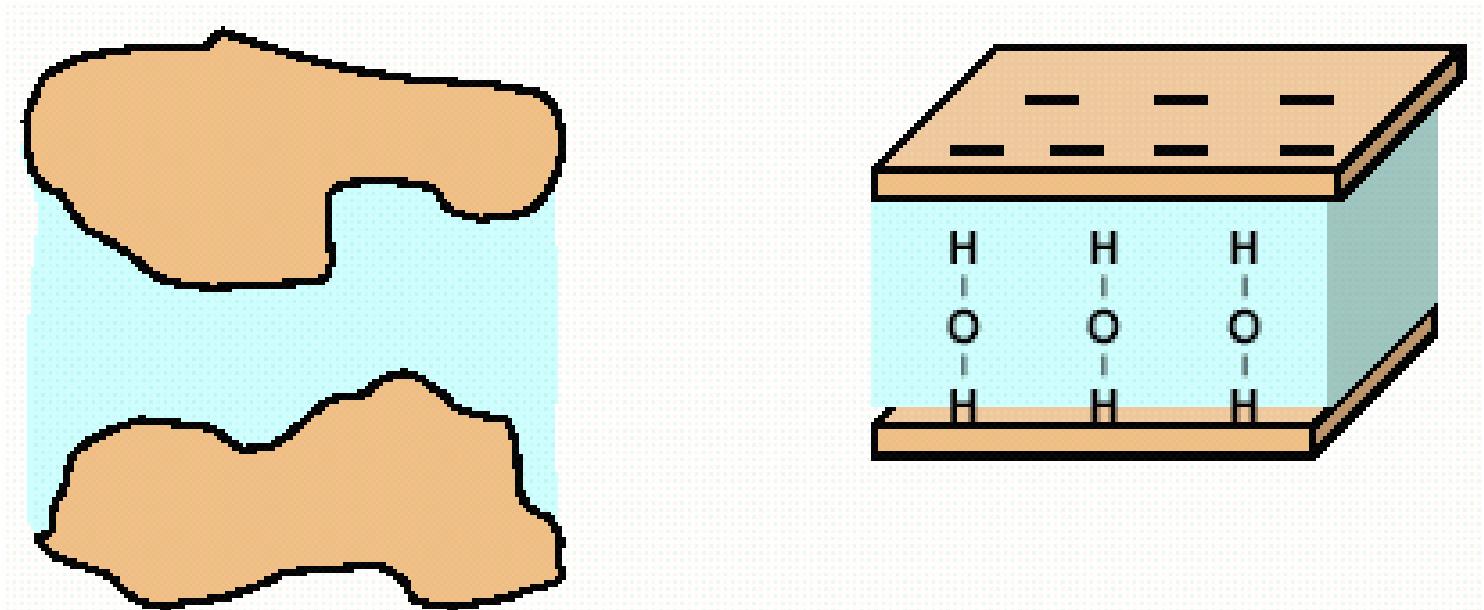






# COESÃO

(c)



## ÂNGULO DE ATRITO INTERNO

( $\phi$ )

