

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO  
RISCO GEOLÓGICO EM ÁREAS  
CARBONÁTICAS, UTILIZANDO SIG: ESTUDO  
DE CASO DO FENÔMENO DE ABATIMENTO DE  
TERRENO NO CENTRO URBANO DE  
CAJAMAR, (SP)**

**Itamar Brancalhão Junior**

**Orientador: Prof. Dr. Ivo Karmann**

**Co-orientador: Geol. Dra. Alessandra C. Corsi (IPT)**

**Monografia de Trabalho de Formatura  
(TF – 26/2006)**

**São Paulo  
2006**

TF  
26/2006  
Lc

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Caracterização e Classificação do Risco Geológico em  
Áreas Carbonáticas, Utilizando SIG: Estudo de Caso  
do Fenômeno de Abatimento de Terreno no Centro  
Urbano de Cajamar (SP)**

**Itamar Brancalhão Junior**



Monografia de Trabalho de Formatura

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Ivo Karmann

Prof. Dr. José Antonio Ferrari

Prof. Dr. Maria da Glória Motta Garcia

São Paulo

2006

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO  
RISCO GEOLÓGICO EM ÁREAS  
CARBONÁTICAS, UTILIZANDO SIG: ESTUDO  
DE CASO DO FENÔMENO DE ABATIMENTO DE  
TERRENO NO CENTRO URBANO DE  
CAJAMAR, (SP)**

**Itamar Brancalhão Junior**

DEDALUS - Acervo - IGC



30900024124



**Orientador: Prof. Dr. Ivo Karmann**  
**Co-orientador: Geol. Dra. Alessandra C. Corsi (IPT)**

Monografia de Trabalho de Formatura  
(TF – 26/2006)

São Paulo  
2006

1. Calepe

2. Fotografia

3. 1975

4. Instituto Biológico

5. a minha mãe

6. este peixe dos corpos

7. que é o que é. Imediatamente os peixes

8. que eu vi e que eu vi e que eu vi

9. Instituto Biológico

10. Ana Brígida

11. que eu vi e que eu vi

12. que eu vi e que eu vi

13. Instituto Biológico

14. Instituto Biológico

15. Instituto Biológico

16. Instituto Biológico

17. Instituto Biológico

18. Instituto Biológico

19. Instituto Biológico

20. Instituto Biológico

21. Instituto Biológico

22. Instituto Biológico

23. Instituto Biológico

24. Instituto Biológico

25. Instituto Biológico

26. Instituto Biológico

27. Instituto Biológico

28. Instituto Biológico

Dedico Este Trabalho à Minha Mãe Onilde Batista  
Brancalhão e ao Meu Pai Itamar Brancalhão

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, nosso Pai Celestial, que sempre esteve ao meu lado através de JESUS, o CRISTO que me proporcionou todas as condições necessárias para que eu realizasse meus sonhos e objetivos.

Ao infinito amor e atenção da minha mãe Onilde Batista Brancalhão e do meu pai Itamar Brancalhão, os quais, que durante toda a minha existência e principalmente nos anos de USP, se privaram de grande parte dos confortos e regalias materiais em prol do meu crescimento pessoal... Infelizmente as palavras não permitem expressar a eterna gratidão e reconhecimento que a eles eu devo... Por isso, a única coisa que eu posso dizer é... Muito Obrigado! Não posso deixar de mencionar também a presença da minha irmã Brígida Batista Brancalhão, que tornou os momentos mais difíceis em situações amenas.

Ao prof .Dr. Ivo Karmann pela orientação, paciência e idéias dedicadas à realização deste trabalho.

À Dra. Alessandra C. Corsi, minha co-orientadora e antes de tudo amiga, sem a qual a realização desta monografia jamais teria sido possível.

A todos os funcionários do IPT que permitiram o acesso a grande parte das informações aqui utilizadas, principalmente à equipe do NURG, onde a maior parte do trabalho foi desenvolvida.

À Prof. Dra. Wânia Duleba, primeiramente pela amizade, pelos conselhos e pelas divertidas situações que passamos juntos nestes últimos meses e também pela total disponibilidade das instalações do laboratório que lidera.

Ao Prof. Dr. Thomas Rich Fairchild pela correção gramatical do "Abstract".

Ao amigo Silas Gubitoso pelo companherismo durante os anos de graduação, principalmente nestes finais.

Aos amigos: Debora Amato, Maria E. Moura, Aranda Caliò, Danilo Rolim, Onicelia Rosa, Andreia Teodoro, Rafaela Bonfante, Juliana, Sueli Tomiko, Rosa Uherara, Vanessa Massimo, Lélia Rocha, Fernanda Rostirola, Priscila Joanico, Naira Alvarenga, Weder Portugal, Viviane das Mercês, Leonardo Marcolan, Carlos Bello, Diego Manetta e Tiago Manetta.

Aos amigos do movimento estudantil Alfa e Ômega (Campus Crusade for Christ), principalmente para Aaron Badenhop e Heather Helgeson pela verdadeira amizade e comprometimento.

A todos os colegas de das turmas de 2001 e 2002 que de alguma forma fizeram parte da minha vida.

“Através das tecnologias geoespaciais, a geografia pode ser utilizada para a sondagem, a carta do zoneamento de risco, a elaboração de mapas temáticos, em foruns digitalizadas e interativos, que permitem a visualização das informações já possuídas, e que permitem a alterar que área encontra-se em risco, e a comparar entre as áreas.”

“Somente o Amor e a Humildade Podem Tornar os Seres Humanos Felizes e É Através da Felicidade Que Conseguimos Quebrar as Barreiras Materiais e Atingirmos o Propósito Mais Sublime de Nossa Existência: A Evolução.”

*Itamar Brancalhão Junior*

## RESUMO

Este trabalho teve dois objetivos principais. O primeiro foi resgatar de forma resumida os trabalhos realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), durante os anos de 1986 e 1987 que tratavam do acidente geológico ocorrido no Centro Urbano de Cajamar no ano de 1986. O segundo foi digitalizar e inserir em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) os mapas e informações relevantes que dizem respeito à questão de Cajamar.

O colapso de terreno em Cajamar se iniciou em 12 de Agosto de 1986 e provocou danos a diversas construções que se situavam nos arredores do colapso. Até o ano de 1987 o IPT identificou e caracterizou as causas do fenômeno. Os estudos se concentraram principalmente em fatores hidrogeológicos, geofísicos, geomorfológicos e geomecânicos. O resultado final foi a elaboração de um zoneamento de risco para a área urbana de Cajamar e concluiu-se que os processos cársticos foram os deflagradores do incidente.

Os mapas (topográfico, potenciométrico e da superfície do topo rochoso do corpo carbonático) foram digitalizados, georreferenciados e inseridos em ambiente SIG utilizando o programa "ArcView". Utilizando a ferramenta topogrid as curvas de isovalores de cada mapa acima relatado foram interpoladas obtendo-se um grid e posteriormente a visualização em três dimensões dos mesmos e a sua superposição.

Informações referentes à malha urbana, a dados de investigação geofísica, a localização de poços, a localização dos furos de sondagem, a carta do zoneamento de risco e às direções de fluxo do aquífero também foram digitalizadas e inseridas no ArcView.

Com o cruzamento das informações foi possível criar uma nova carta de risco para o centro de Cajamar e afirmar que área encontra-se entre as classes kII e kIII.

Uma comparação entre as duas cartas de risco também foi feita e se conclui que aquela elaborada pelo IPT teve caráter predominantemente remediativo enquanto a carta proposta neste trabalho possui caráter preventivo.

## ABSTRACT

The purpose of this paper is two-folded: first, to summarize the most important aspects analyzed by the Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) from 1986 to 1987, concerning the geological accident that took place in Cajamar (SP) in 1986 and, second, to transform into digital files the most relevant charts, maps and information developed by IPT for the Cajamar issue and then slot them into the Geographic Information Systems (GIS) format.

The Cajamar collapse began in 12<sup>th</sup> August 1986 and damaged several buildings. From 1986 to 1987, the IPT studied the causes of this phenomenon as well as its characteristics. These studies mainly involved hydrogeological, geophysical, geomorphological and geomechanical aspects. As a result, a geohazard chart for Cajamar has been made and the causes for the collapse have been attributed to karstic processes that occurred in the region. Other maps and charts were elaborated as well.

Topographic, potentiometric and carbonate rockhead data were digitalized, georeferenced and turned into GIS format. Using the TOPOGRID tool from ArcView software, the topographic, potentiometric and the rockhead models were created. Other information was slotted into digital files and GIS format for enriching the system, for instance: urban area, geophysical data, wells locations, Cajamar sinkhole location, IPT geohazard chart, water flow directions and the borehole locations.

Cross-checking the information above allowed the creation of a new geohazard chart for the area and also the engineering classification as somewhere between the kII and kIII classes.

Comparison the two geohazard charts shows that the one created by the IPT has a remedial aspect while the new chart has greater predictive value.

## SUMARIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. METAS E OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
<b>3. TRABALHOS PRÉVIOS.....</b>	<b>2</b>
<b>3.1. GEOLOGIA LOCAL .....</b>	<b>2</b>
<b>3.2. CARACTERIZAÇÃO DE ÁREAS CARBONÁTICAS .....</b>	<b>3</b>
<b>3.2.1. Feições de dissolução em rochas carbonáticas.....</b>	<b>3</b>
<b>3.2.2. Morfologia Cárstica.....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.3. Tipos de Carste .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.4. Classificação e Caracterização de Áreas Cársticas .....</b>	<b>8</b>
<b>3.3 CARACTERIZAÇÃO DO ABATIMENTO DE TERRENO OCORRIDO EM CAJAMAR (SP). .....</b>	<b>9</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>13</b>
<b>5. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....</b>	<b>21</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>22</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>39</b>
<b>9. ANEXO .....</b>	<b>42</b>

## 1. Introdução

Problemas envolvendo desastres e acidentes em terrenos cársticos causam inúmeros prejuízos à vida humana e também à economia, como por exemplo o acidente ocorrido em Cajamar no ano de 1986 (IPT, 1987c) e também cabe citar o acidente envolvendo o colapso cárstico ocorrido em Tangshan, China, que no ano de 1988 causou a queda do teto de um estádio resultando em prejuízos de aproximadamente 1.2 milhões de dólares (Wang *et al.*, 1997).

As cavidades subterrâneas constituem um risco eminente para várias formas de construção. A forma mais comum de ocorrência de uma cavidade natural é a causada pela dissolução do corpo rochoso pela ação de águas subterrâneas principalmente em calcários, dolomitos, gipso e sal (Culshaw & Waltham, 1987).

Apesar dos calcários serem os menos solúveis dos três, é neste tipo de rocha que os complexos de cavernas maiores e mais desenvolvidos são encontrados (Culshaw & Waltham, 1987). Outros processos como movimentação de terra e lava também podem gerar vazios subterrâneos em rochas menos solúveis do que as aqui listadas, porém estas não são alvos deste trabalho.

Esta monografia de trabalho de formatura reúne os trabalhos realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) nos anos de 1986 e 1987 que versaram a respeito do fenômeno geológico de abatimento de terreno ocorrido em Cajamar, SP, cujo início é datado de 12 de agosto de 1986 (IPT, 1987c).

Os dados obtidos no levantamento foram digitalizados, elaborados banco de dados, e posteriormente inseridos em ambiente de Sistemas de Informação Geográficas (SIG).

Considerando-se que Cajamar encontra-se na região metropolitana de São Paulo (Figura 1) e possui grande potencial para novos empreendimentos, riscos, danos e perdas da ordem dos descritos anteriormente não são mais aceitáveis.

## **2. Metas e Objetivos**

O objetivo geral desta monografia foi resgatar os trabalhos realizados pelo IPT nos anos de 1986 e 1987 no âmbito do acidente ocorrido no centro da cidade de Cajamar envolvendo um abatimento de terreno.

Como objetivo específico, tem-se a digitalização e sistematização em SIG de mapas, cartas e informações, considerados relevantes para o entendimento dos processos geológicos que ocorreram em Cajamar responsáveis pela deflagração do acidente geológico de 1986.

Através desta digitalização e inserção em SIG dos dados, foi possível classificar a área, utilizando a metodologia proposta por Waltham & Fookes (2003), consequentemente, gerando-se uma nova carta de risco para a área urbana de Cajamar e finalmente comparar as duas cartas de risco em relação as suas características metodológicas e funcionais.

## **3. Trabalhos Prévios**

### **3.1. Geologia Local**

As rochas carbonáticas de Cajamar já foram alvos de estudo de diversos autores. No ano de 1981 o IPT mapeou com detalhe as pedreiras situadas a sul da cidade (Pacheco, 2000) e concluiu que vários corpos de calcário, de formato tabular e espessuras variáveis ocorrem na região.

Aos 12 de agosto de 1986 um acidente geológico aconteceu na cidade de Cajamar (IPT, 1987c), mais especificamente um colapso de solo devido a um dolinamento, que ocorreu no centro urbano do município e ocasionou o desabamento de residências que se situavam ao redor.

Cajamar está a sul da Zona de Cisalhamento de Jundiuvira e a Norte da de Taxaquara. Nesta área há metassedimentos proterozóicos do Grupo São Roque e, Provavelmente, metassedimentos anteriores, assim como vulcânicas associadas, do Grupo Serra do Itaberaba (Juliani, 1986), intrudidos por alguns corpos de granitóides sin a tardiorogênicos.

Segundo Santoro *et al.*, (1988) ocorrem no Município de Cajamar e arredores, cinco unidades litológicas correlacionáveis ao Grupo São Roque, sendo elas metapelitos, metabasitos, rochas carbonáticas e coberturas Cenozóicas.

Os metarenitos da base são representados por duas unidades, sendo uma constituída por uma faixa de micaxistas e a outra por filitos sericíticos. Estaurolita-muscovita

xistos ocorrem com menor freqüência. Intercalações de metarenitos arcoseanos e quartzitos metapsamíticos são comuns, (Santoro *et al.*, 1988).

Anfíbolitos metabásíticos se alojam entre as unidades metapelíticas supracitadas, principalmente onde há o contato dos micaxistas com os filitos, (Santoro *et al.*, 1988).

Acima dos metapelitos existe um nível de rochas carbonáticas, constituído por calcários e dolomitos metamórficos com intercalações locais de filitos sericíticos ou carbonáticos e metargilitos. A rocha carbonática mais comum é um calcário metamórfico bandado de coloração cinza claro/cinza escuro, que contém muitas cavidades de dimensões variadas e estão ocupadas por água e ou material alterado e recortados por um reticulado de veios centimétricos de alcita e quartzo, Pacheco (2000).

O topo da coluna estratigráfica é ocupado por metapsamitos arcoseanos, de granulação fina a média, que podem ser conglomeráticos e meta-quartzo arenitos, existe também intercalações de metapelitos, Pacheco (2000).

A evolução geomorfológica da região se insere no domínio da serrania de São Roque (Almeida (1964); Ponçano *et al.*, 1981). Associa-se a esta evolução depósitos aluvionares, coluvionares e de talus, de idade cenozóica.

Hachiro & Santoro (1986) concluíram que os pacotes rochosos se estruturaram em blocos adernados ao redor de 25° para SE, devido a falhas normais escalonadas, na direção NE-SW. Segundo estes autores, existem grabens assimétricos conformados por estas falhas que protegiam os sítios de acumulação de sedimentos recentes e bem mais antigos, cujas características sedimentares ainda encontram-se preservadas. Também houve uma sucessão terrígeno-carbonática singular, distinta dos sedimentos do Grupo São Roque, caracterizada pelo baixo grau de metamorfismo e pela quase ausência de deformação, assim como pela litologia diferenciada. Então, concluiu-se que em Cajamar (Hashiro & Santoro, 1996) havia uma bacia de Idade Neoproterozóica-Eopaleozóica superposta às rochas precedentes do Grupo São Roque.

### 3.2. Caracterização de Áreas Carbonáticas

#### 3.2.1. Feições de dissolução em rochas carbonáticas

Todos os tipos de rochas carbonáticas são favoráveis à dissolução pela ação de águas subterrâneas. As maiores cavidades são encontradas em calcários compactados, dolomitos e mármore. Calcários cuja porosidade é alta, como gesso e travertino, tendem a desenvolverem principalmente microcavidades (Culshaw & Waltham, 1987).

A dissolução de carbonatos é lenta da ordem de milímetros por 100 anos, mas pode ser acelerada em fissuras sob condições de alto fluxo de água (Waltham & Fookes, 2003). Um fator importante para a dissolução de carbonatos em águas naturais é geralmente a presença de dióxido de carbono, o que gera o bicarbonato de sódio (Culshaw &

Waltham, 1987). A maior parte do dióxido de carbono de subsuperfície provém da matéria orgânica (principalmente a oriunda de solos) e possui um forte controle climático.

Conseqüentemente, ponderando os demais fatores, calcários de clima tropical são mais cavernosos do que aqueles de climas temperados e periglacial. As soluções também podem ter origens em solos ácidos e ricos em matéria orgânica ou por ácido sulfúrico e sulfuroso de origem superficial ou hidrotermal, normalmente tais processos estão completamente subordinados às soluções de dióxido de carbono (Culshaw & Waltham, 1987).

A circulação destas soluções gera cavidades subterrâneas através do aumento de tamanho secundário de feições primárias de um maciço e, desta forma, depressões fechadas com drenagens internas são formadas (Culshaw & Waltham, 1987).

Os terrenos cársticos são caracterizados por drenagens subterrâneas, sendo cavernas e dolinas as principais feições diagnósticas. Descritivamente as dolinas podem ser: cônicas, ovais, hemisféricas ou irregulares de depressão fechada, ocorrem tanto na superfície quanto soterradas no topo rochoso. Geneticamente elas podem ser classificadas, segundo Culshaw & Waltham (1987) em:

- a. DOLINAS DE DISSOLUÇÃO (dissolution sinkhole): é o simples abaixando da superfície que se observa em paisagens cársticas, que podem ser observadas em quase todos os calcários. Em seção essas dolinas têm forma de vales mas em planta elas exibem drenagens convergentes. A taxa de formação é medidas em relação ao tempo geológico. Seu aparecimento se relaciona com as feições estruturais do maciço. Este tipo de dolina não apresenta um risco geológico;
- b. DOLINAS DE COLAPSO (collapse sinkhole): este tipo de feição é formado pelo colapso da superfície em direção a cavernas, está relacionadas a colapsos rápidos do teto de cavernas, algo raro, e também zonas amplamente fissuradas do maciço, o tipo mais freqüente. Os processos de colapso são geralmente contemporâneos e erosivos, algo que gera múltiplas origens para este tipo de dolinas. O alto grau de colapsamento pode nos indicar a presença de grandes cavidades subterrâneas, o que faz classificar este tipo de dolinas de grande risco geológico;
- c. DOLINAS DE SUBSIDÊNCIA (dropout sinkhole): estes tipos de dolinas são formadas pela subsidências de uma cobertura em direção a vazios de um maciço carbonático. São comuns onde o material de cobertura está inconsolidado. Há dois tipos básicos de dolinas de subsidência em um deles o sedimento de cobertura preenche progressivamente os vazios subterrâneos o que causa uma lenta subsidência da superfície, o que não resulta um aumento de tamanho das cavidades, para Waltam & Fookes (2003), este tipo é denominado **dolina de sufosão** (suffosion sinkhole). Outro tipo, está relacionado aos locais onde a

cobertura inconsolidada é formada por argilas coesivas ou em areias úmida, que podem formar barreiras sobre vazios levando ao aumento dos mesmos, o que pode resultar na subsidência do material superior; Waltam & Fookes, (2003) denominam este tipo de dolina como **dolina de abatimento** (caprock sinkhole). Os locais destas quedas são imprevisíveis uma vez que não se conhece a distribuição das mesmas, pois estão relacionadas ao carste coberto. Elas tendem a ocorrer onde há variação do nível d'água principalmente um declínio assim como as cavidades do solo se desenvolvem onde há variação do nível d'água. Trabalhos na África do Sul mostraram que as quedas do nível d'água tendem a ocorrer nas margens das depressões do corpo carstificado ou em zonas onde o topo rochoso é irregular e anguloso. Apresentam um risco eminente para a geologia.

- d. DOLINAS DE SOTERRAMENTO (buried sinkhole): Ocorrem em calcários e são preenchidas por sedimentos, comumente não possuem expressão na superfície, são formadas por dissolução superficial, como solapamentos superficiais que foram posteriormente preenchidos por sedimentos, são associados tanto a cavidades do maciço quanto a dos solos, os maiores riscos geológicos estão relacionados as fundações.

Estes tipos de dolinas podem ser observados na Figura 1.

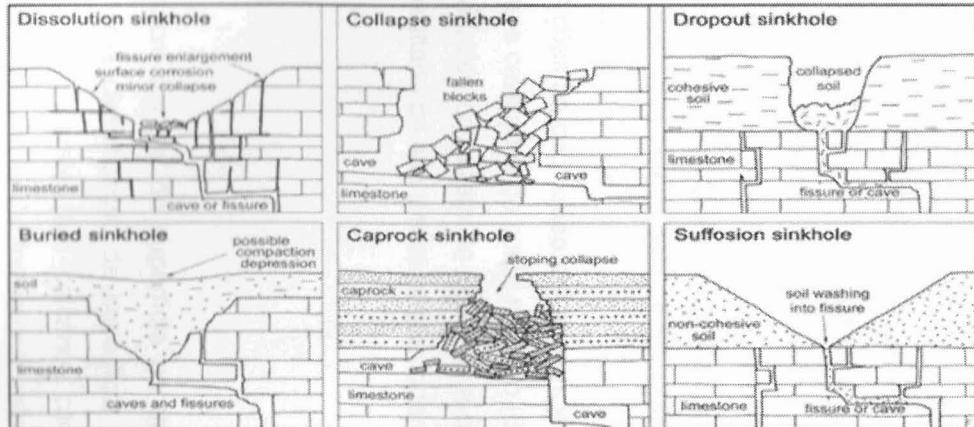


Figura 1: Tipos de dolina Culshaw & Waltham (1987)

### 3.2.2. Morfologia Cárstica

Um carste apresenta indefinidas variações e complexos sistemas tridimensionais de fissuras e vazios entalhados em rochas carbonáticas (principalmente calcários). As dissoluções ocorrem em afloramentos expostos, no topo rochoso encoberto por solos (carste coberto) e ao longo de fraturas subterrâneas. Superfície, topo rochoso e feições subterrâneas são integradas em um sistema cárstico, que podem ser agrupadas em cinco amplas classes de feições, as quais são (Waltham & Fookes, 2003):

- a. MICRO FEIÇÕES DE SUPERFÍCIE: caneluras, de até 1m em profundidade;
- b. MACRO FEIÇÕES DE SUPERFÍCIE: Vales cegos, dolinas, poljes, cones e torres, todas estas feições na escala de quilômetros aparecem caracteristicamente dependendo do tipo do carste (Ford & Williams, 1989);
- c. FEIÇÕES DE SUBSOLO: Caracterizadas pelas complexas morfologias do topo rochoso com relevos locais que podem ultrapassar 10m, resultado da dissolução das águas provenientes do solo;
- d. DOLINAS: São feições de depressão em superfície da ordem de 1 a 1000m que estão relacionadas a cavidades do corpo rochoso (Bell *et al.*, 2004);
- e. CAVERNAS: Cavidades da ordem de dezenas a centenas de metros dentro do corpo rochoso, resultado da sua dissolução e podem estar vazias ou preenchidas por sedimentos.

### 3.2.3. Tipos de Carste

A combinação de macro feições de superfície geram formas distintas em áreas cársticas algo que permite uma classificação da superfície cárstica. Estes conjuntos de feições criam tipos principais de carste (em calcário) cada qual com suas próprias características e seus desenvolvimento estão fortemente relacionados ao regime climático específico da região (Ford & Williams, 1989; Waltham & Fookes, 2003).

- a. GLACIOCARSTE: Possui extensas superfícies de rocha decapada exposta como pavimentos de calcário, cicatrizes rochosas e profundas feições de entalhamento, ocorre a altas latitudes e altitudes, onde seu entalhamento se deu pelo gelo e degelo das geleiras Pleistocênicas com influência mínima do desenvolvimento de solos pós glaciais. A região de Yorkshire Dales na Inglaterra, é um exemplo.
- b. FLUVIOCARSTE: Possui extensos sistemas dendríticos de vales cegos, cortados por rios antes que estes desapareçam em drenagens subterrâneas rumo às cavernas, a maior parte ocorre em regiões onde houve estágios periglaciais

durante os períodos gelados do Pleistoceno, como tem-se em Derbyshire Peak, Inglaterra.

- c. CARSTE DOMINADO POR DOLINAS: Apresenta sistemas poligonais de sistemas interfluviais que separam dolinas em um intervalo que pode variar de 100-1000 metros, as quais são predominantes aos vales pois todo o sistema de drenagem é subterrâneo, este tipo de carste pode ser considerado maturo e se desenvolve em regiões temperadas como nos climas mediterrâneos.
- d. CARSTE POLIGONAL: é reconhecido pela grande presença de morros cônicos ou hemisféricos de calcário variando de 30 a 100 metros de altura por entre pequenas depressões fechadas marcadas por dolinas e grandes poljes aluvionares. Representa carstes muito maturos e está em grande parte restrito a regiões intertropicais.
- e. CARSTE DOMINADO POR TORRES: apresenta as feições denominada de torres que ocorrem isoladas, lado a lado atingindo a alturas entre 50-100m acima da planície cárstica aluvionar, é um tipo de carste maturamente bem desenvolvido e se restringe a regiões tropicais úmidas de atividade tectônica ativa no tempo geológico e que não tenha se cessado totalmente.

Estas subdivisões dos tipos principais de carste podem apresentar feições menores extras como feições cársticas desenvolvidas em climas áridos por exemplo. Para as obras de engenharia é inivitável e impressindível que estas características particulares sejam amplamente conhecidas (Culshaw & Waltham, 1987).

### 3.2.4. Classificação e Caracterização de Áreas Cársticas

A literatura geomorfológica classifica as feições e tipos cársticos com referências a processos que estão relacionados a extensos ambientes climáticos (Waltham & Fookes, 2003), por esta razão, os tipos cársticos refletem a maturidade cárstica que são mais altas em climas úmidos do que em regiões secas e frias e a base para este tipo de classificação esta relacionado aos graus de carstificação dos maciços.

A primeira classificação cárstica para a engenharia (Fookes & Hawkins, 1988) posteriormente modificada por (Fookes, 1997) e em seguida apresentada por (Waltham & Fookes, 2003), a qual foi utilizada neste trabalho, baseia-se nas dolinas carste com referencia aos seus topos rochosos e sua morfologia, que são bem abrangentes.

As classificações de rochas intemperizadas e de maciços rochosos não consideram os terrenos cársticos em especial (Bieniawski, 1973; Barton *et al.*, 1974; Anon, 1995)

Desta forma, a classificação proposta por Waltham & Fookes (2003) torna-se a mais completa e abrangente para os objetivos deste trabalho.

### 3.3 Caracterização do Abatimento de Terreno ocorrido em Cajamar (SP).

Estes dados foram resgatados dos seguintes trabalhos listados nas referências bibliográficas: (IPT, 1986a, b,c; IPT, 1987a,b,c)

O abatimento de terreno que ocorreu no município de Cajamar, iniciou-se no dia 12 de agosto de 1986. Os trabalhos de estudo sobre o fenômeno ocorrido teve seu término em 1987.

Os locais onde os trabalhos foram realizados são: Lavrinhas, Vila Branca, Jordanésia e proximidades de Polvilho.

Desde os primeiros contatos dos técnicos com os dados, foi-se apontado à hipótese de evolução de grandes cavidades no subsolo. Estas evidências podem ser apresentadas resumidamente como se segue:

- a. rápida evolução inicial do afundamento;
- b. os antecedentes do colapso (meses antes e relatos na ocasião) ruídos, deformações de pisos, trincas em edificações, alta freqüência de rupturas na rede de distribuição d'água, secamento de fontes perenes;
- c. evolução do surgimento de trincas em edificações e continuidade das rupturas de tubulação da rede de distribuição de água em toda a área urbana de Lavrinhas e Vila Branca, após a ocorrência do colapso;
- d. grandes volumes de solo envolvidos, seja aquele relativo ao colapso em si, seja aquele afetado pelas movimentações que originaram todas as demais evidências em superfície.

Foi necessária a consideração de dados que apontavam no sentido de se interpretarem as presumidas grandes cavidades do subsolo como originadas por condicionantes cársticos, que são:

- a. informações relativas ao poço SABESP que indicavam a presença de calcário com cavidades em profundidade, bem como sua elevada vazão específica obtida no início do bombeamento (150m/h);
- b. presença de afloramentos de calcário a pouco mais de um quilômetro da área afetada, apresentando cavidades de dissolução, que se mostram vazias ou preenchidas por solo e ainda, associadas a afundamentos na superfície, junto à pedreira Pires;
- c. a forma do buraco provocado pelo colapso, de tronco invertido, prolongando-se para um cilindro, em profundidade, conforme inspeção no inicio do afundamento, e;
- d. a morfologia da depressão onde se assentam os bairros de Lavrinhas e Vila Branca que, em apresentando calcários em seu subsolo, sugere uma unidade de

relevo, cujo modelo admite a contribuição de fenômenos de afundamento e de acumulação de materiais detriticos.

A partir destas considerações , o colapso de solos em Cajamar estaria relacionado a cavidades mais profundas, desenvolvidas por dissolução de calcário no subsolo. Sua evolução e reflexos na superfície seriam típicos da evolução de situações semelhantes, descritas em outras partes do mundo. Desta forma, os trabalhos foram concebidos e levados a cabo buscando estabelecer as causas e mecanismos mais prováveis da evolução dos fenômenos, de modo a avaliar de forma mais rápida e segura os riscos a que a população esta submetida e estabelecer os modos de resolução do problema.

O enfoque metodológico foi integrar e interpretar passo a passo os trabalhos desenvolvidos em Cajamar para definir, no mais breve lapso de tempo, a intensidade e as dimensões do fenômeno ocorrido, no sentido de determinar as medidas preventivas necessárias e eliminar o risco de vida e estabelecer formas de solução para o problema a médio e longo prazo, assim, a programação dos trabalhos foi dinamicamente modificada, ao que as investigações iam produzindo novos resultados.

A caracterização do fenômeno foi baseada em :

- a. investigações de sondagem;
- b. antecedentes históricos quanto aos aspectos de urbanização e mineração em Cajamar;
- c. histórico relativo ao fenômeno;
- d. resenha bibliográfica sobre fenômenos similares e sobre carste;
- e. mapeamento e instrumentação de trincas;
- f. medidas de subsidência e deformação em edificações;
- g. análise e interpretação dos resultados.

Os bairros de Lavrinhas e Vila Branca não registraram evidências superficiais de movimentação meses antes do acidente.

A instalação dos poços data de 1979 para a Indústria e Comércio de Bebidas Cajamar e 1982 para a SABESP. Incidentes sensíveis são observados a partir de março de 1984, devido ao abastecimento de Jordanésia e no começo de 1986, com a retomada plena das atividades da Fábrica de Bebidas que esteve interrompida por 8 meses. A pedreira Pires reiniciou as atividades no final de 1986, esgotou uma cava durante o período de abril a agosto de 1986, a qual permaneceu acumulado uma coluna d'água de 7m de altura, ao menos por 3 anos.

Levantamento geológico em escala 1:10.000 para os bairros de Lavrinhas e Vila Branca e levantamento de detalhe, na escala 1:2.000, que destaca o arcabouço litológico e estrutural de toda a região do acidente. Neste levantamento foram localizadas e identificadas com precisão as rochas carbonáticas do subsolo de Lavrinhas e Vila Branca,

encontram-se pouco metamorfizadas e se intercalam em filitos e ardósias. Este levantamento subsidiou a locação e descrição de sondagens.

O caminhamento elétrico foi o método mais eficiente na identificação de cavidades no subsolo por detectar anomalias condutoras cujas análises serviram de importantes critérios na orientação da locação de sondagens mecânicas e na avaliação da extensão em área dos fenômenos deflagrados no subsolo

A realização da campanha de furos orientados permitiu a verificação, amostragem e quantificação das dimensões dos elementos envolvidos, tais quais extensão em área; presença e grandeza das características geotécnicas do depósito detritico sobre o calcário, onde se apresenta a maior parte da área urbanizada. Das sondagens que indicaram calcário na área urbanizada, 13 identificaram cavidades com dimensão de até 4m de altura preenchidas por água ou por solos inconsistentes, com espessuras superiores a 10m. Em toda a área foram instalados piezômetros. Sondagens rotativas (20) e a percussão (32), ensaios SPT e de infiltração visaram atender às necessidades da avaliação de riscos.

Medidas de movimentação e recalque assinalam manifestações superficiais dos fenômenos do subsolo. As medidas de recalque, através da leitura sistemática de 174 marcos topográficos amplamente distribuídos por Lavrinhas e Vila Branca medem os movimentos verticais e acelerações;

Os recalques mais acentuados situaram-se na área entre a ocorrência do colapso de 1986, na Praça Benedito Martins. Até janeiro de 1987, cerca de 70 marcos apresentavam velocidades máximas da ordem de 1cm/mês, o que representa alta velocidade de subsidência.

Com base na distribuição dos potenciais hidráulicos medidos na rede piezométrica e nos resultados de ensaios de caracterização hidráulica, o sistema aquífero local foi definido comportando duas unidades (Superior e Inferior) com construção e conformação espacial bastante complexas. A superior, do tipo livre, com permeabilidade e capacidade de drenagem bastante baixa; constituídas por solos coluvionares, predominantemente argilosos, que são da parte superior do pacote detritico que cobre os calcários; transmissividade 5000 vezes menores que a unidade inferior, apresenta comportamento de aquitarde. A inferior, do tipo confinado a localmente semiconfinado, heterogêneo e com pronunciada anisotropia hidráulica, constituído de calcários carstificados e os "solos siltosos marrons" da base do depósito detritico. As relações espaciais com a unidade superior, que confirma, é bastante complexa devido às diferenças hidráulicas entre as unidades. As cargas entre os dois aquíferos variam entre cerca de 2m a 20m, a partir da margem do ribeirão das Lavras, sendo que a sua direita os dois aquíferos apresentam individualidade. Na margem esquerda não é possível a individualização das cargas hidráulicas. Esta região é também caracterizada como área de recarga do aquífero inferior. O aquífero inferior é utilizado para o abastecimento público e industrial local.

As medidas para a resolução do problema envolveram parâmetros de medidas preventivas de caráter emergencial que visavam afastar de imediato a população devido ao risco de vida imposto pela probabilidade de novos colapsos ou desabamentos de edificações afetadas pelo recalque, estas medidas também abrangiam a suspensão das operações de bombeamento dos poços da SABESP e da Industria de Refrigerantes e operações de esgotamento da cava da pedreira 5 Pires, e também o estabelecimento das medidas de caráter permanente, cujo resultado final foi o zoneamento do risco nos Bairros de Lavrinhas e Vila Branca:

- a. Zona desprovida de risco (Zona I): substrato rochoso constituído por filitos, metarenitos e quartzitos capeados por seus solos de alteração ou corpos coluvionares de pequena espessura (<10m). Não estão sujeitos a fenômenos de subsidência e colapso; não se excluem riscos próprios de áreas íngremes.
- b. Zona sob observação (Zona II): área constituída por depósitos detriticos de composição muito variada, bastante espessos (até 100m de espessura) característicos de depressões cársticas. Apresenta risco potencial permanente de ocorrência de fenômenos de colapsamento de solo, logo, imprópria à ocupação urbana.
- c. Zona condenada (Zona III): mesma litologia da zona II, mas apresentam franca evolução e aceleração dos fenômenos de subsidência e colapso; área imprópria à ocupação urbana.

As diretrizes para a implantação de ações nestas zonas foram:

- 1) Zona I: área habitável, destacando-se as orientações mínimas, que são: evitar construção de moradias, coletar e dispor as águas pluviais e servidas, não executar determinadas obras sem implantação de estruturas que dêem proteção superficial e de drenagem a áreas terraplenadas e expostas à ação erosiva de águas da chuva.
- 2) Zona II: permitida a ocupação de casas em caráter transitório ,sujeita à evacuação. Observar ocorrência de fenômenos iguais aos que ocorreram meses e dias antes do colapso de 12/08/1986, tais quais:
  - a. evolução de trincas em paredes, muros, etc;
  - b. variações rápidas do nível d'água em poços domésticos;
  - c. rompimento na rede hidráulica de abastecimento
  - d. deslocamento e/ou estufamento de reboques, azulejos, etc;
  - e. esmagamentos de estruturas rígidas;
  - f. surgimentos de trincas no solo;
  - g. ruídos semelhantes a explosões de pedreira, acompanhados ou não por tremores de terra.

- 3) Zona III: deverá ser impedida a ocupação das moradias, devendo ser destinada a outros usos que não o assentamento urbano.

Por fim, foram estabelecidas medidas como:

- a. procedimentos no campo da hidrogeologia e geotecnica tais como cessação dos bombeamentos d'água, injeção de água no subsolo, drenos filtrantes sobre fraturas no topo rochoso;
- b. práticas e obras dos campos da engenharia de fundações e geologia de engenharia como estaqueamentos diversos, compactação do terreno, escavação e tratamento do topo rochoso, obturação das cavidades no solo e no calcário por injeção de caldas, argamassas e agregados.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para a realização do presente trabalho, foi seguido as seguintes etapas:

- a. Levantamento Bibliográfico: constou de um levantamento exaustivo de informações sobre o tema do trabalho, evolvendo trabalhos em periódicos, congressos, simpósios, relatórios técnicos, dissertações e teses;
- b. Digitalização de mapas : nesta etapa do trabalho foram digitalizados no Programa Autocad a base planialtimétrica (topográfica) (Figura 3) da área do trabalho na escala 1:2.000 e também as cartas contendo os dados potenciométricos (Figura 4) do aquífero inferior (para 12/12/1986), geofísicos (figura 3) e dados referentes ao topo rochoso do corpo carbonático (Figura 5);
- c. Sistema de Informação Geográfica (SIG): após a digitalização dos dados pertinentes ao desenvolvimento do trabalho, as diversas informações foram reunidas em ambiente SIG, utilizando-se o programa “ArcView” e através da ferramenta “MDT” gerou-se modelos digitais de terrenos;
- d. Caracterização e classificação do risco geológico em áreas carbonáticas: nesta etapa analisou-se geométricamente os modelos tridimensionais gerados em SIG considerando-se que a utilização de dados

A classificação adotada para este trabalho é a descrita por Waltham & Fookes (2003). Segundo Waltham & Fookes (2003) os parâmetros da classificação cárstica não podem ser mais que um guia para o conhecimento das propriedades cársticas de determinadas regiões. O autor também afirma que problemas posteriores são causados pela interdependência entre os componentes de um carste.

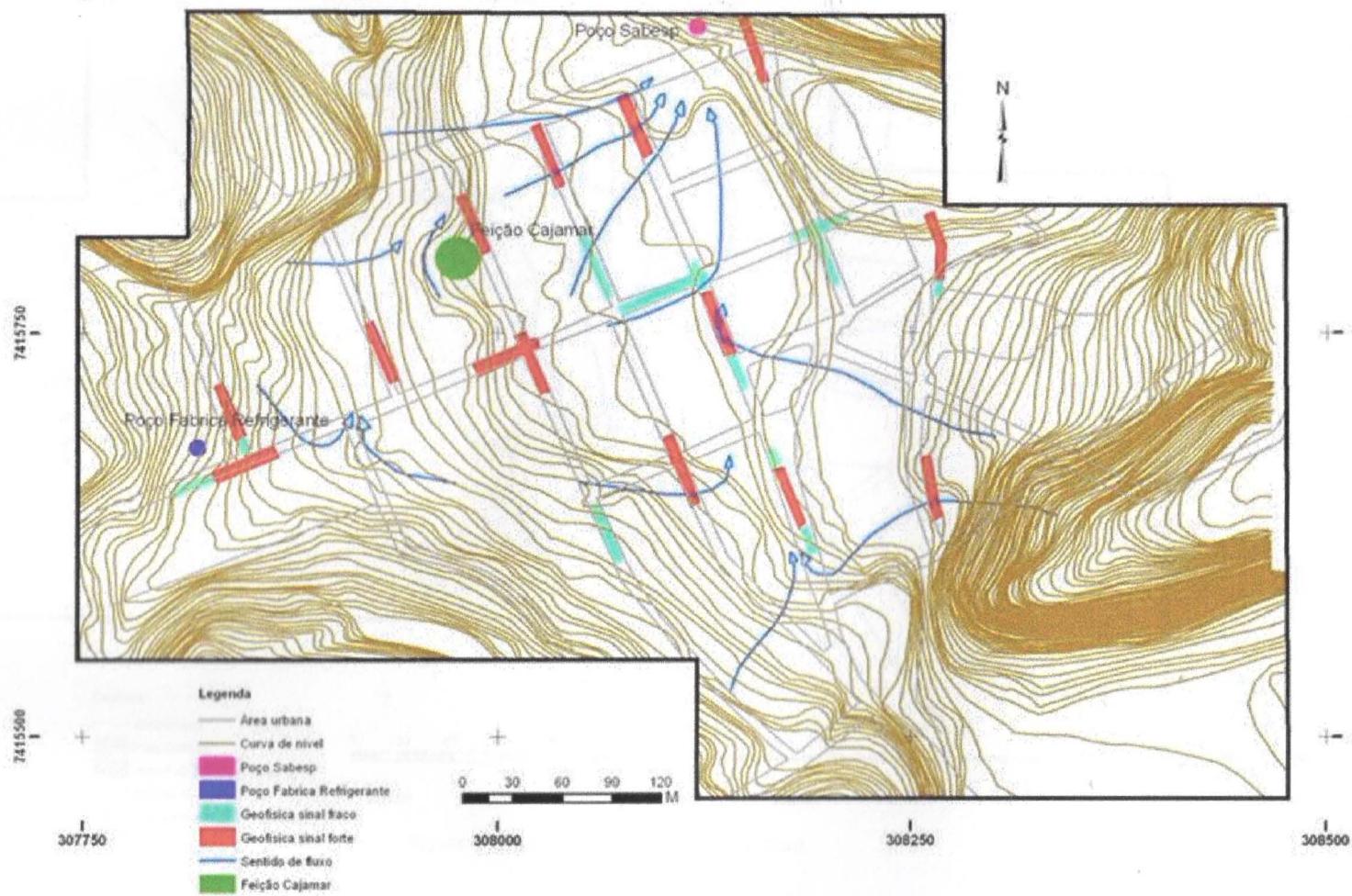


Figura 3: Curvas de nível e locação das investigações geofísicas.

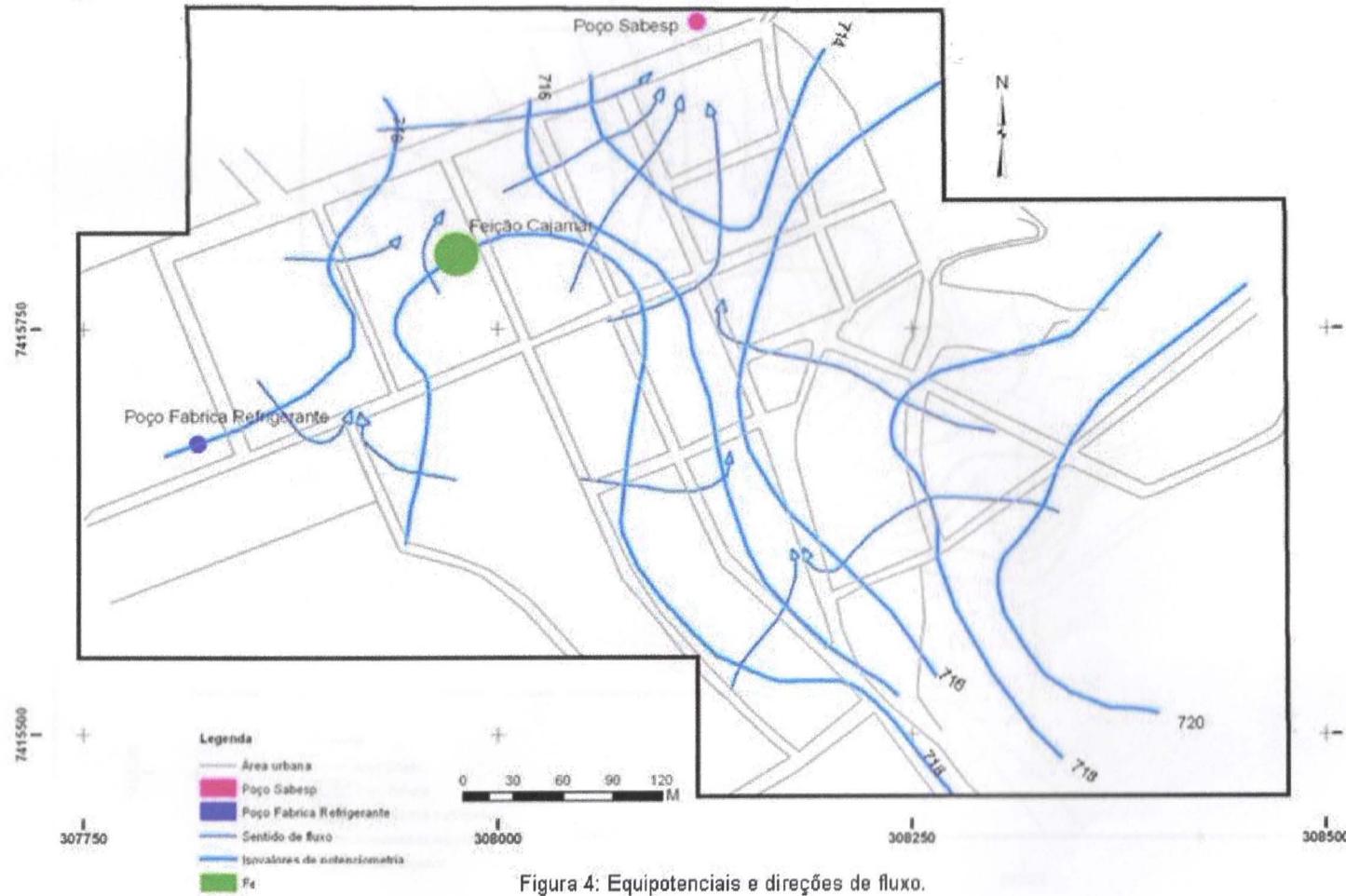


Figura 4: Equipotenciais e direções de fluxo.



Figura 5: Isovalores para a superfície do topo rochoso.

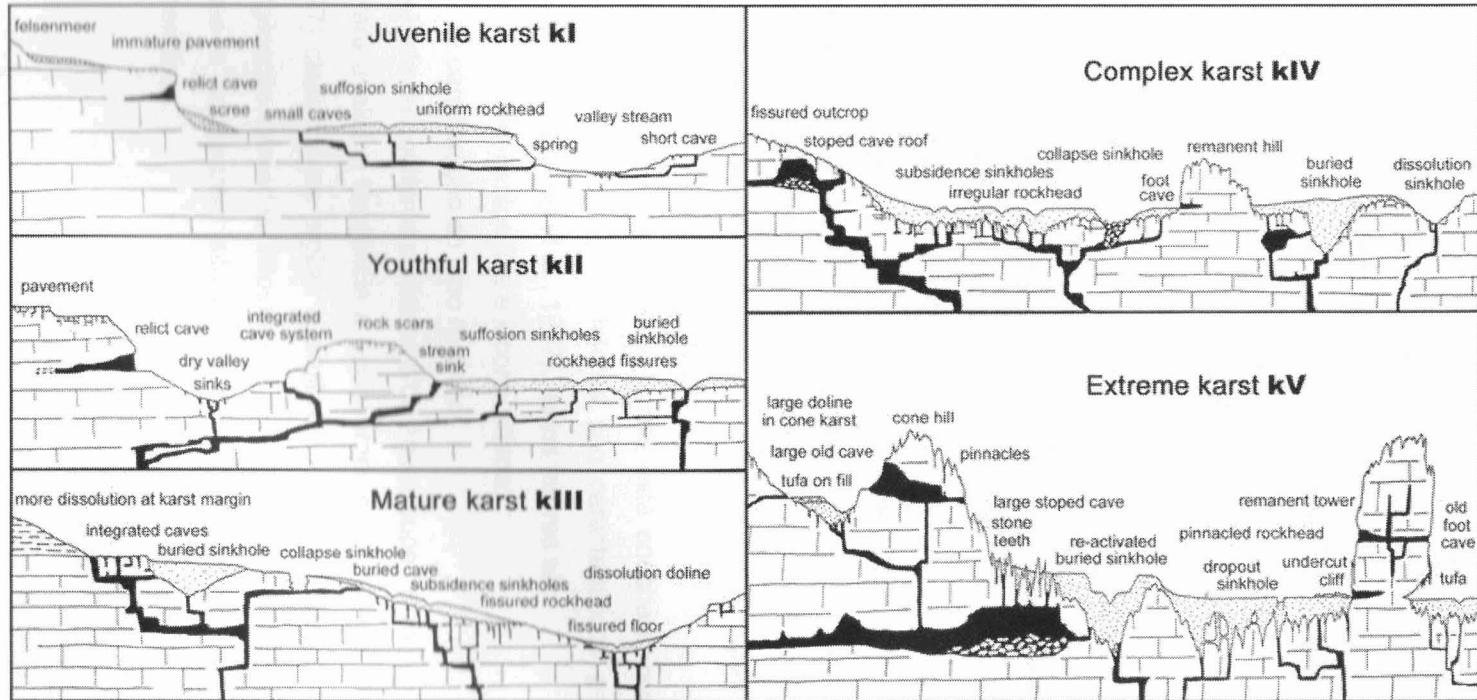


Figura 6: Feições morfológicas típicas de cada classe cárstica segundo Waltham & Fookes (2003).

Waltham & Fookes (2003) exemplifica sua classificação ao afirmar que em uma área classificada na média como kIII (tabela 1) pode apresentar regiões de classe kV, assim como uma área classificada como kV pode apresentar regiões específicas tidas como KII (Waltham & Fookes, 2003), por exemplo. Por estas razões, recomenda-se aplicar esta metodologia em pequenas unidades de área, assim como metodologias que não considerem tais recomendações torna-se ineficazes e falhas. A figura 2 ilustra áreas classificadas por esta metodologia.

Nesta classificação (Waltham & Fookes, 2003) quatro fatores são levados em consideração, que são: **classe cárstica**, cujas diretrizes para classificação encontram-se na tabela 1 e figura 2 e figura 6; **densidade de dolinas**, que é um simples número de ocorrência por unidade de área( $km^2/ano$ ), baseado em mapeamento de campo, mapas disponíveis e fotos aéreas, deve-se considerar que as densidades podem ser baixas porque as dolinas são grandes, idealmente é expressa em NSH; **tamanho de cavernas** que expressa a dimensão em metros de dados disponíveis da área, porém que represente as dimensões da possível caverna que poderá ser encontrada na área e **relevo do topo rochoso** que expressa em metros a media local do topo rochoso do corpo cárstico, que inclui profundidades encontradas nas dolinas soterradas, onde for possível, topos rochosos angulosos devem ser distinguidos dos mais tabulares.

No caso de Cajamar, onde o carste está encoberto por solos (camadas de até 50m) (IPT, 1987c) alguns fatores são característicos para a ocorrência de colapsos de solos (Wang *et al.*, 1997), estes fatores são:

- a. camada de sedimentos fina e inconsolidada;
- b. Grau de carstificação do topo rochoso;
- c. Existência de aquíferos cársticos e/ou águas superficiais.

Para avaliar a tendência a colapsamento do material de cobertura, Wang *et al.*, (1997) classifica as argilas e argilas siltosas menos propensas a colapsarem; siltes argilosose camadas siltosas vêm depois e, por último, as coberturas mais propensas a colapsarem são as areias de fina a mal selecionadas e camadas conglomeráticas.

Classes Cársticas	Localização	Dolinas	Topo Rochoso	Fissuramento	Cavernas	Investigações de Superfície
kl "Juvenile"	Somente em desertos e zonas periglaciais ou em carbonatos impuros	Raras, NSH < 0,001	Praticamente uniforme, poucas fissuras	Mínimo; baixa permeabilidade secundária	Raras, pequenas e isoladas	Convencional
kII "Youthful"	Regiões temperadas	Poucas, dos tipos de sufosão e abatimento, falhas abertas com fluxo de agua; NSH 0,001-0,05	Abundância de pequenas fissuras	Distribuído a poucos metros abaixo da superfície	Presença de pequenas cavernas (3m)	Principalmente convencional, com amostragem de rocha a cada 3 metros checando-se fissuras no topo rochoso
kIII "Mature"	Comum em regiões temperadas; regiões de clima tropical úmido	Os tipos sufosão e de abatimento são comuns, grandes dolinas de dissolução e pequenas dolinas de colapso e soterramento; NSH 0,05-1,0	Fissuramento extensivo; relevo menor que 5m; blocos basculados no material de cobertura	Grande parte das fissuras apresenta extensivas aberturas secundárias	Ocorrência de cavernas maiores de 5 metros de comprimento em vários níveis	amostragem do topo rochoso; e da rocha a cada 4 metros; investigações de microgravidade.
kIV "Complex"	Em regiões temperadas; comum em regiões tropicais	Extensas dolinas de dissolução abundantes; numerosas dolinas de subsidência; cicatrizes de dolinas de colapso e de soterramento; NSH 0,5-2,0	Recortado com pilares de 5 a 20 m de comprimento	Extensas aberturas de dissolução longe das fissuras maiores	maiores que 5 metros e diversos níveis	amostragem do corpo rochoso a cada 5 metros e investigações de microgravidade.
kV "Extreme"	Somente em áreas tropicais úmidas	Extensas dolinas de todos os tipos, arcos de solos remanecentes compactados em dolinas de soterramento; NSH>>1	Amplamente recortados com pilares de comprimento superior a 20 metros por entre profundas fissuras de solo	Abundante e com presença de sistemas de cavernas com câmaras superiores a 15 metros de comprimento	complexo sistemas de cavernas com câmaras superiores a 15 metros de comprimento	Investigações de superfície individualizadas para cada unidade de investigação

Tabela 1: Parâmetros da classificação de Waltham &amp; Fookes (2003)

## 5. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O desenvolvimento deste trabalho se deu, ao longo do ano de 2006 da seguinte maneira:

- **Janeiro , fevereiro e março:** As atividades referentes a estes meses consistiram na pesquisa e localizações dos relatórios técnicos do IPT, assim como os primeiros contatos com os materiais do tema e finalmente a proposta de um projeto inicial de trabalho;
  - **Abri:** Entrega do projeto inicial e planejamento de viagens de Campo;
  - **Maio e junho:** Viagem de campo em conjunto com o orientador para visita dos locais onde ocorreu o fenômeno de abatimento de terreno, em Cajamar, triagem dos relatórios internos do IPT úteis para este trabalho e levantamento bibliográfico sobre metodologias aqui aplicadas, redação do relatório parcial de atividades;
  - **Julho e agosto:** Entrega do relatório parcial de atividades e inicio da digitalização do material disponível;
  - **Setembro e outubro:** Criação dos bancos de dados e modelos geológicos em SIG, cruzamentos de dados, obtenção dos resultados finais , conclusões e redação da monografia de trabalho de formatura;
  - **Novembro:** Entrega da monografia e preparação da apresentação pública;
  - **Dezembro:** Apresentação pública.

A tabela2, abaixo ilustra o cronograma das atividades realizadas. Cabe ressaltar que as pesquisas bibliográficas se deram até o final da conclusão deste trabalho.

Tabela 2: Cronograma das atividades desenvolvidas.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados digitalizados e inseridos em ambiente SIG, gerou-se as seguintes cartas, utilizando-se a ferramenta topogrid:

- a. Modelo digital de terreno para a topográfica (Figura 7);
- b. Modelo digital para a superfície potenciométrica do aquífero inferior (Figura 9).
- c. Modelo digital para a superfície do topo rochoso (Figura 11).

Através do modelo digital para o topo rochoso verifica-se que há um vale que coincide, em superfície, com o local onde ocorreu o colapsamento de solos. Também pode-se observar que a alguns metros a sudeste do local do acidente, existem dois pontos localizados onde o topo rochoso encontra-se aprofundado.

O modelo digital para a superfície potenciométrica, cruzado com o modelo do topo rochoso, possibilitou constatar que o nível d'água encontra-se em grande parte, para a área de estudo, nos sedimentos de cobertura ao corpo carbonático.

Estes três modelos digitais de terrenos também podem ser visualizados no formato de superfícies tridimensionais, respectivamente como mencionados anteriormente, Figuras 8, 10 e 12, as quais permitem melhor visualização do contexto geológico da localidade.

Também foram criadas as seguintes camadas para compor o banco de dados:

- a. área do acidente geológico, denominada como “Feijão Cajamar”;
- b. poço SABESP;
- c. poço da fábrica de Refrigerantes;
- d. malha urbana para o ano de 1986;
- e. malhas do levantamento geofísico;
- f. direções de fluxo d'água do aquífero;
- g. zoneamento de risco elaborado pelo IPT em 1987 (Figura 13).

Através do cruzamento dos três modelos digitais de terrenos, foram gerados em SIG, quatro perfis (Figura 17), que permitem estabelecer correlações entre as distâncias e geometrias em seções das variáveis em questão (topografia, nível d'água e superfície do topo rochoso). A sobreposição das superfícies tridimensionais dos modelos digitais gerados pode ser vista na figura 15.

Com o cruzamento de todas as informações inseridas em ArcView e com o auxílio da classificação proposta por Waltham & Fookes (2004) delimitou-se zonas de risco para a região central de Cajamar, onde foram estabelecidas três áreas, sendo: Zona I = risco baixo; Zona II = risco médio e Zona III = alto risco (Figura 14).

A divisão em três classes se baseou naquela proposta por IPT (1987c), para que comparações entre os dois zoneamentos pudessem ser estabelecidas, porém nos trabalhos

do IPT (1987c) outras metodologias e propósitos foram utilizados para o zoneamento de risco. A sobreposição da superfície tridimensional do zoneamento de risco proposto por esta monografia e com a superfície tridimensional do topo rochoso pode ser vista na figura 16.

Observa-se que IPT (1987c) ao delimitar as zonas de risco geológico levou em consideração a malha urbana, pois o objetivo maior dos trabalhos foi preservar a vida humana e definir parâmetros para o reassentamento da população cujas moradias se situavam nos arredores de onde ocorreu o acidente. Assim, como se pode observar, analisando todo o contexto em que os estudos foram desenvolvidos, que os trabalhos realizados na época pelo IPT foram de caráter predominantemente remediativos, algo que, consequentemente, levou à delimitação das zonas de risco visualizado na figura 13.

O zoneamento obtido nesta monografia utilizou a classificação de Waltham & Fookes (2003) para a delimitação das áreas de risco geológico, com ênfase na quantidade do material de cobertura e da geometria do topo do corpo carbonático, considerando que nas áreas onde o topo rochoso encoberto apresenta maiores declividades é onde encontra-se as maiores irregularidades, algo que pode ser notado observando-se a classificação de Waltham & Fookes (2003).

Em ambos os zoneamentos (Figuras 13 e 14), como eram de se esperar, a região onde o colapsamento ocorreu, encontra-se na área de maior risco.

Este zoneamento, assim, tem caráter mais preventivo, uma vez que a classificação de Waltham & Fookes (2003), possui características preventivas, além de descrever as morfologias características de cada classe cárstica, sugere investigações de superfície e o estabelecimento de fundações, para que acidentes geológicos de origem cárstica não ocorram. Desta forma, entende-se que a diferença das áreas de maior risco, observada em ambos zoneamentos se devem a estes fatores.

O cruzamento das informações geradas em SIG, também permitiu classificar a área de estudo segundo as classes de Waltham & Fookes (2004). Nota-se que, através dos perfis (Figura gerados em comparação com as figuras 2 e 6, a região do centro urbano de Cajamar se enquadraria entre as classes KII e KIII.

Utilizando-se da tabela 1 e analisando as Figuras 2 e 6, juntamente com as informações obtidas do cruzamento de informações em SIG, pode-se dizer que o centro urbano de Cajamar preenche os seguintes requisitos referentes às classes KII e KIII, segundo Waltham & Fookes (2004): Taxa do número de dolina por área (NSH) encontra-se entre 0.05 e 1 (área aproximada em  $\text{km}^2$  é de 0.24, desde 1986 observou-se apenas a dolina do centro de Cajamar, logo  $1/0.24/20 = 0,208 \text{ km}^2/\text{ano}$ ), porém é importante enfatizar que este tipo de dado é somente uma generalização para a área de estudo em questão e o período de tempo analisado Waltham & Fookes (2003); o topo rochoso não é uniforme, apresentando diferentes profundidades e geometrias, como pode ser observado no modelo digital de terreno para o topo rochoso do corpo carbonático. A respeito do fraturamento do

topo rochoso, não foi possível gerar arquivos digitais pontuais a partir das descrições de sondagens disponíveis e interpolá-los de forma a gerar um modelo tridimensional do terreno, logo este item não pode ser ponderado, porém, como já mencionada anteriormente, os locais onde há maiores desniveis da superfície do topo rochoso, são os locais onde de observam as maiores irregularidades para a classificação atribuída a área de estudo. Apesar de Waltham & Fookes (2004) dizerem que nos tipos kII e KIII ocorrerem cavernas, as mesmas não são descritas na bibliografia consultada, não são observadas nos modelos digitais em SIG e também não foram encontradas nas excursões de campo realizadas, porém não é descartada a possibilidade de haver dutos cuja extensão se enquadre no termo "caverna" (tabela 1) descrito por Waltham & Fookes (2004). Os itens Investigação de Superfície e Fundações não foram analisados pois não se enquadram nos objetivos desta monografia.

Finalmente, todas as informações inseridas em SIG encontram-se disponíveis em forma de CD (executável em Arcview versão 9.0) que acompanha este trabalho no anexo A.

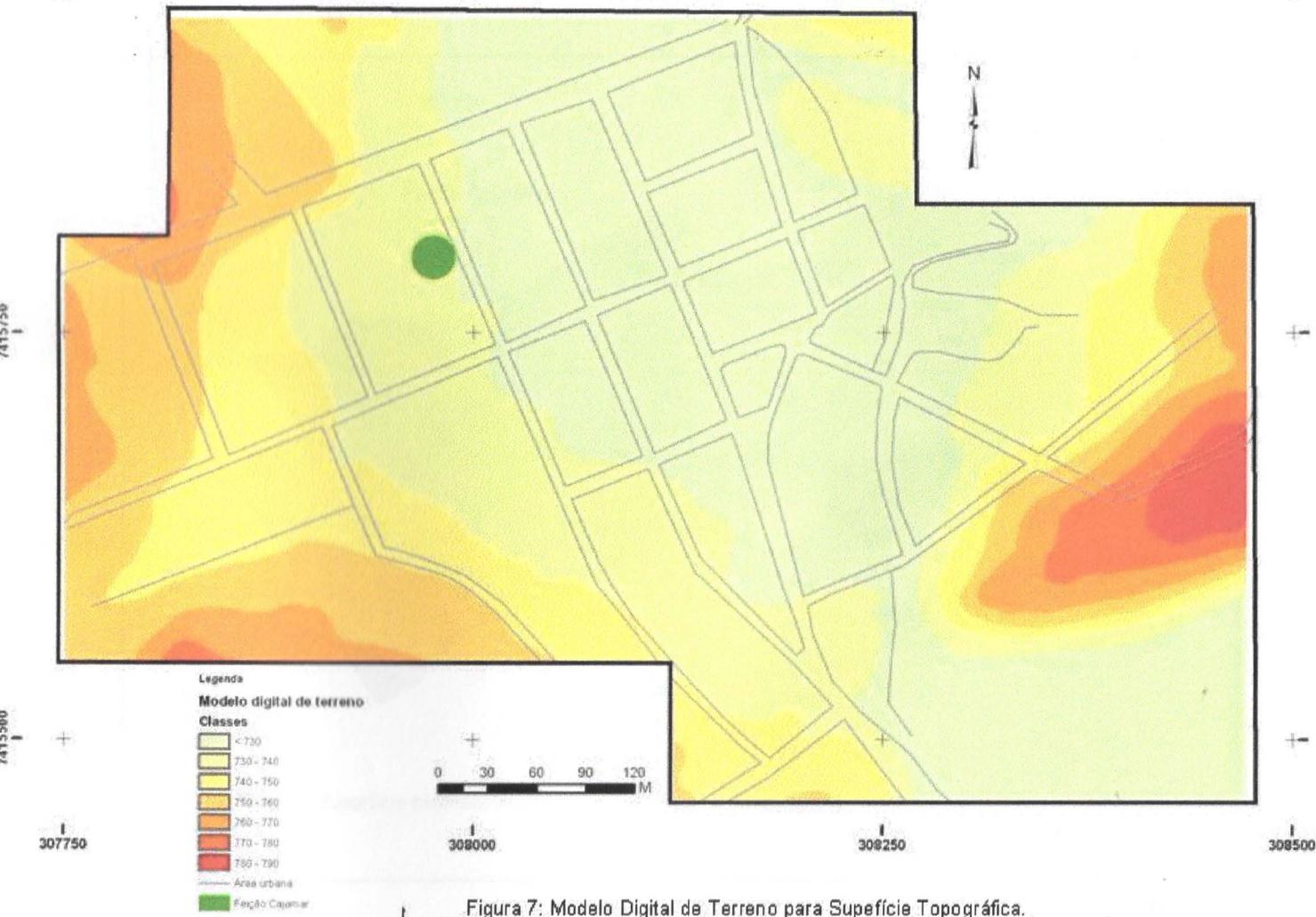


Figura 7: Modelo Digital de Terreno para Superfície Topográfica.

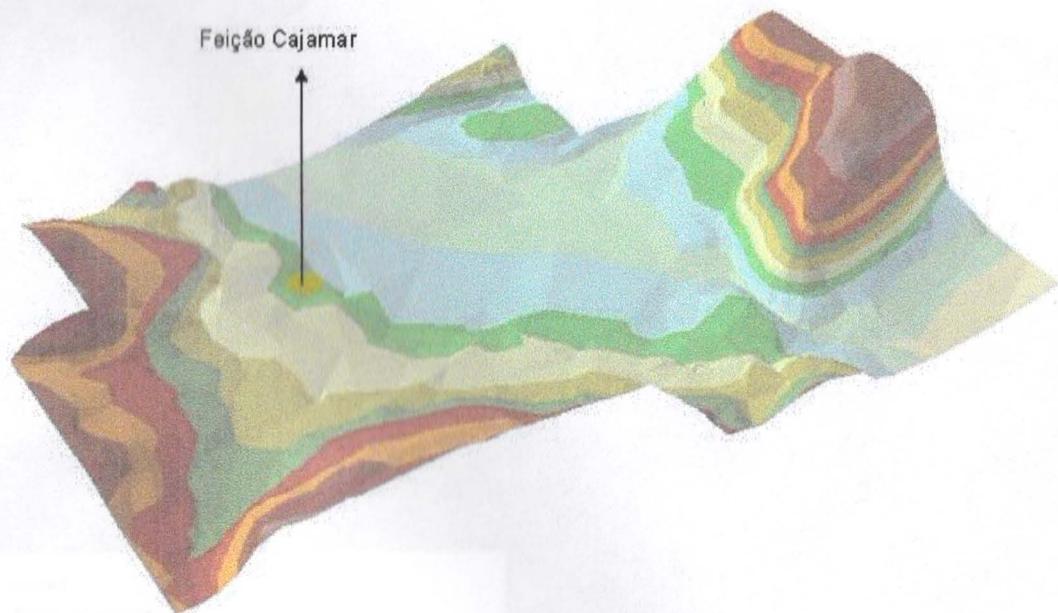


Figura 8: Superfície tridimensional para o modelo digital da topografia

741750

745500

307750

308000

308250

308500

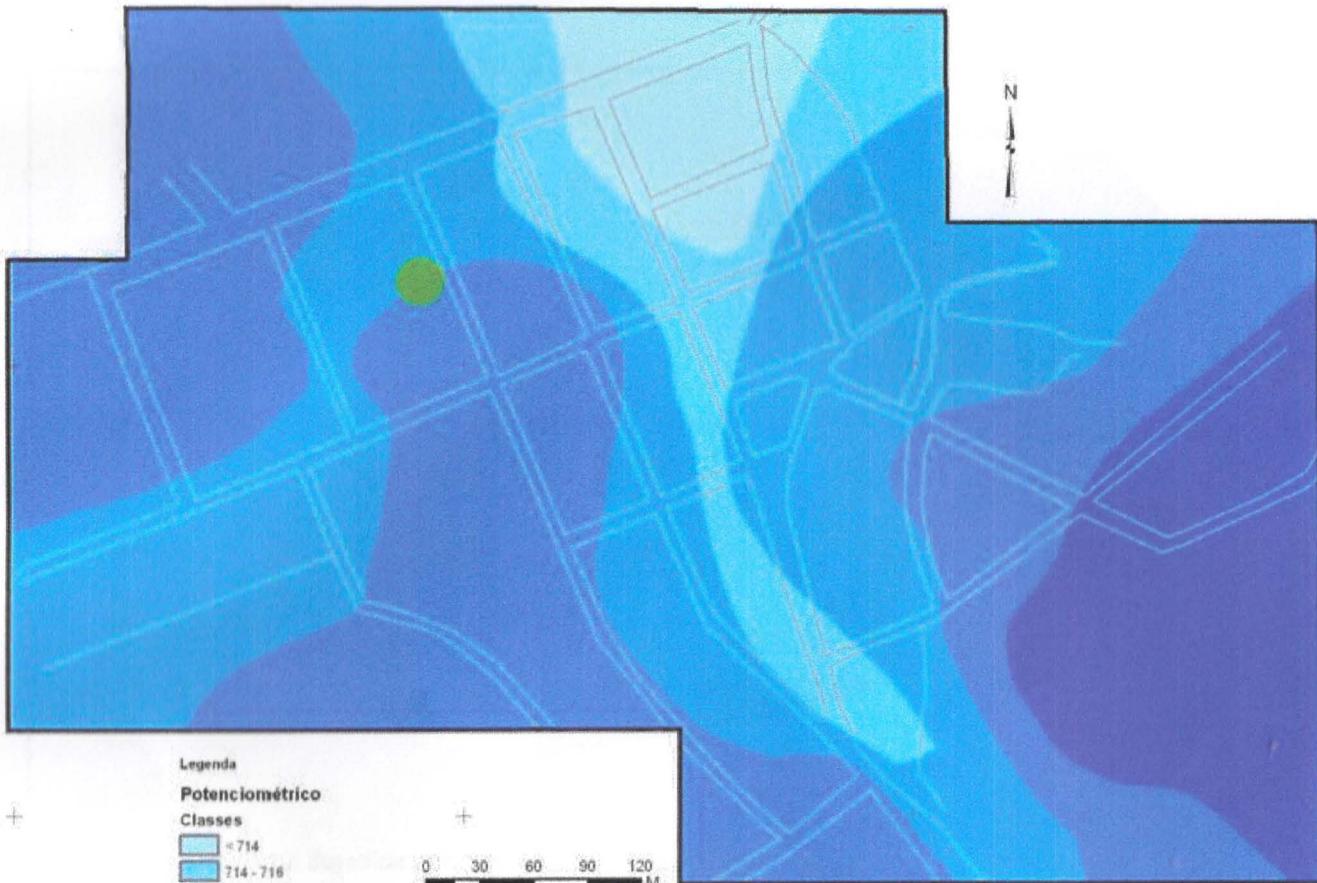


Figura 9: Modelo digital para os dados potenciométricos.

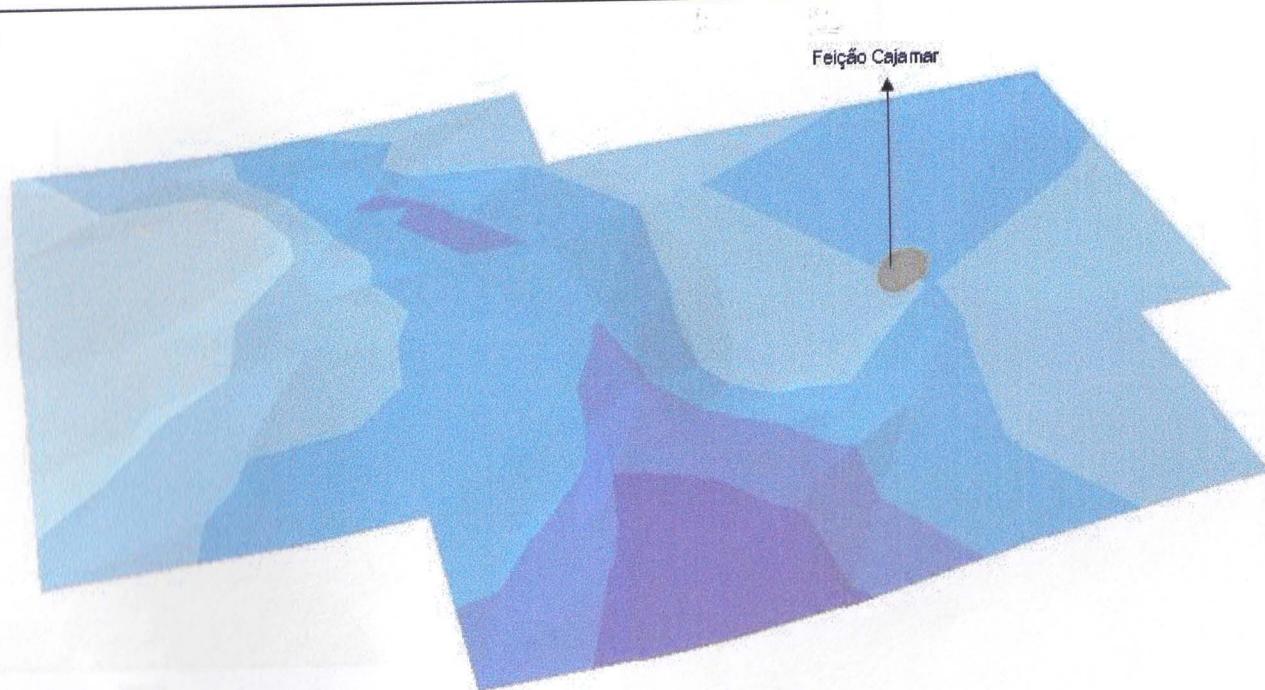


Figura 10: Superfície tridimensional para o modelo digital potenciométrico.

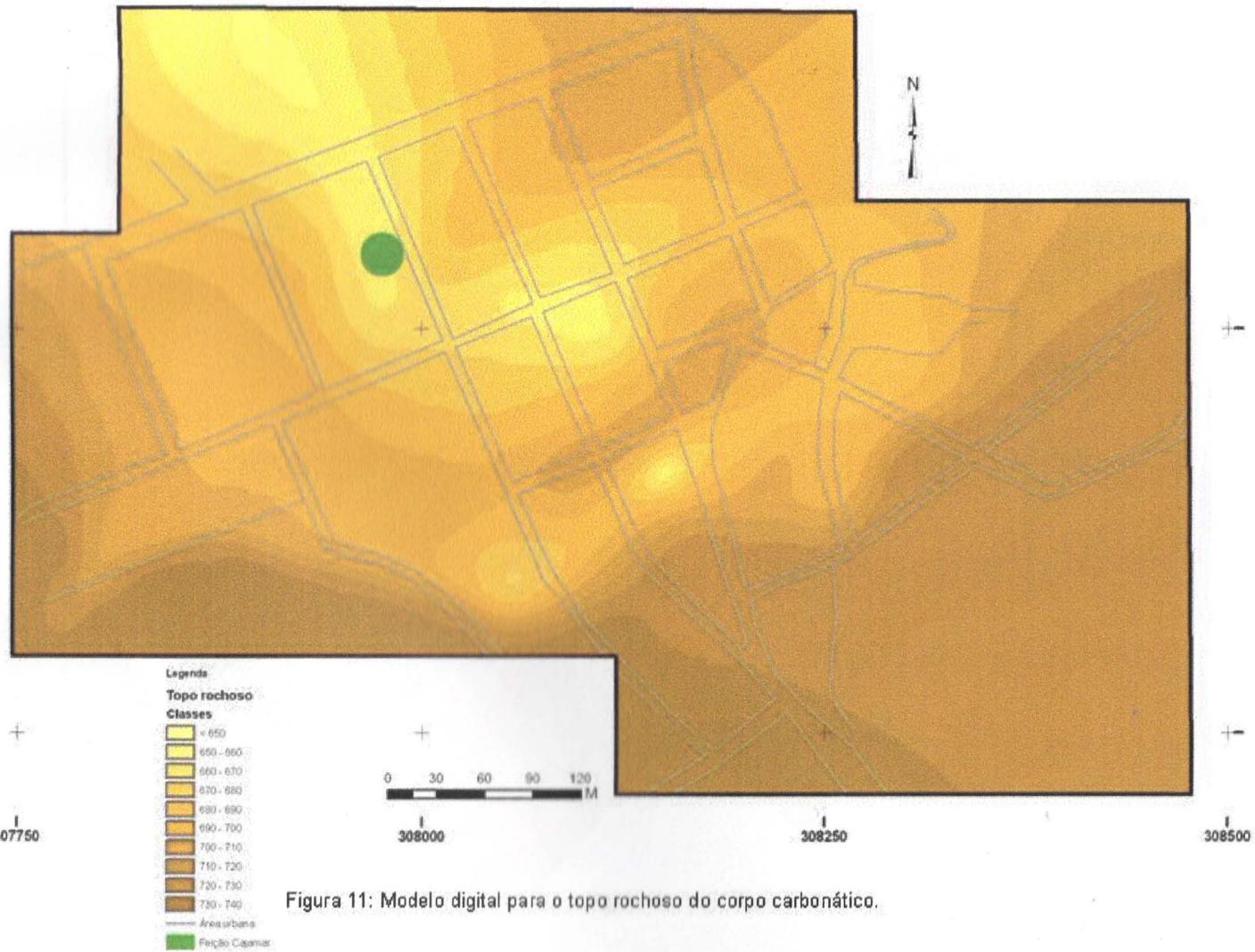


Figura 11: Modelo digital para o topo rochoso do corpo carbonático.

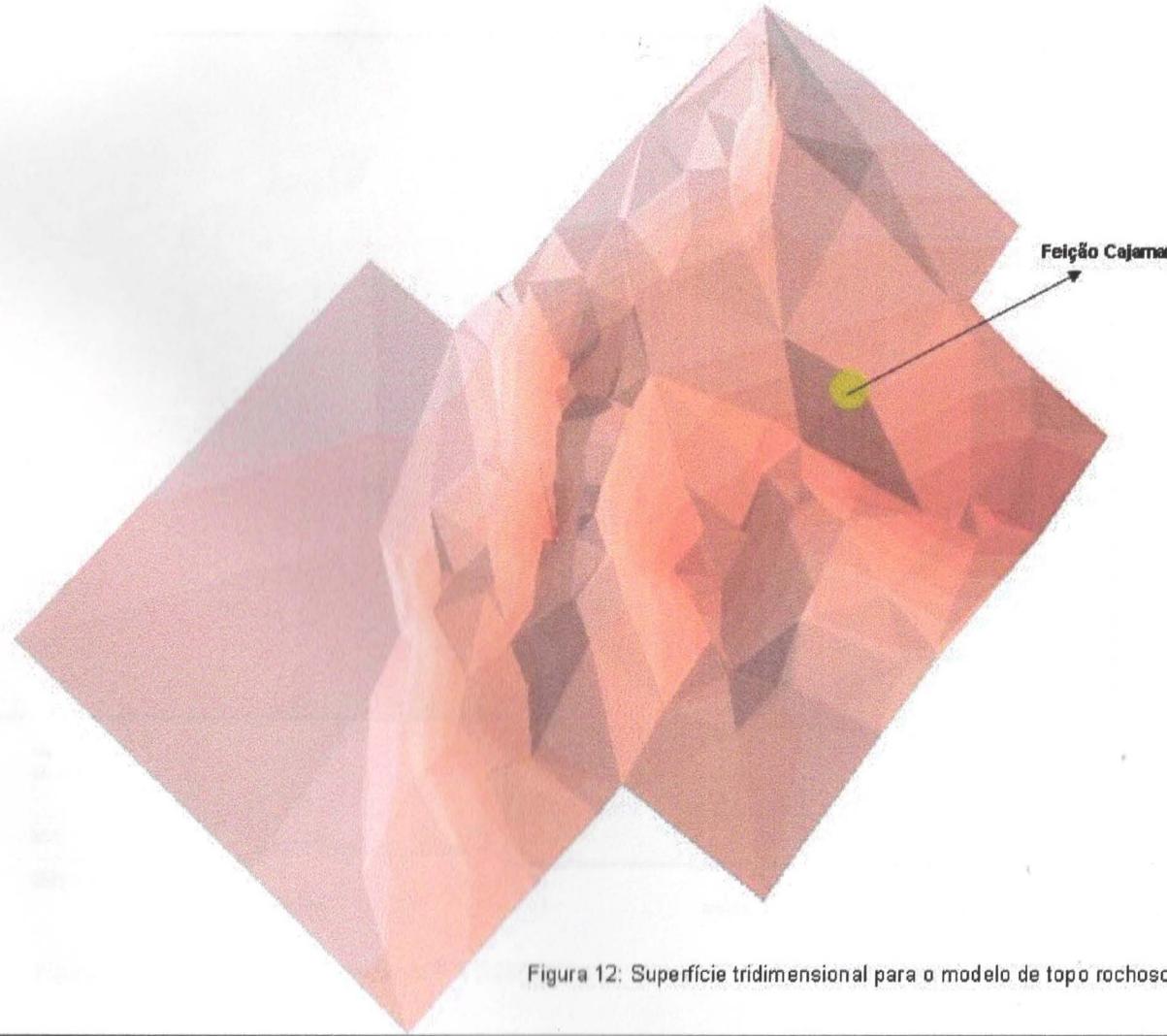


Figura 12: Superfície tridimensional para o modelo de topo rochoso.

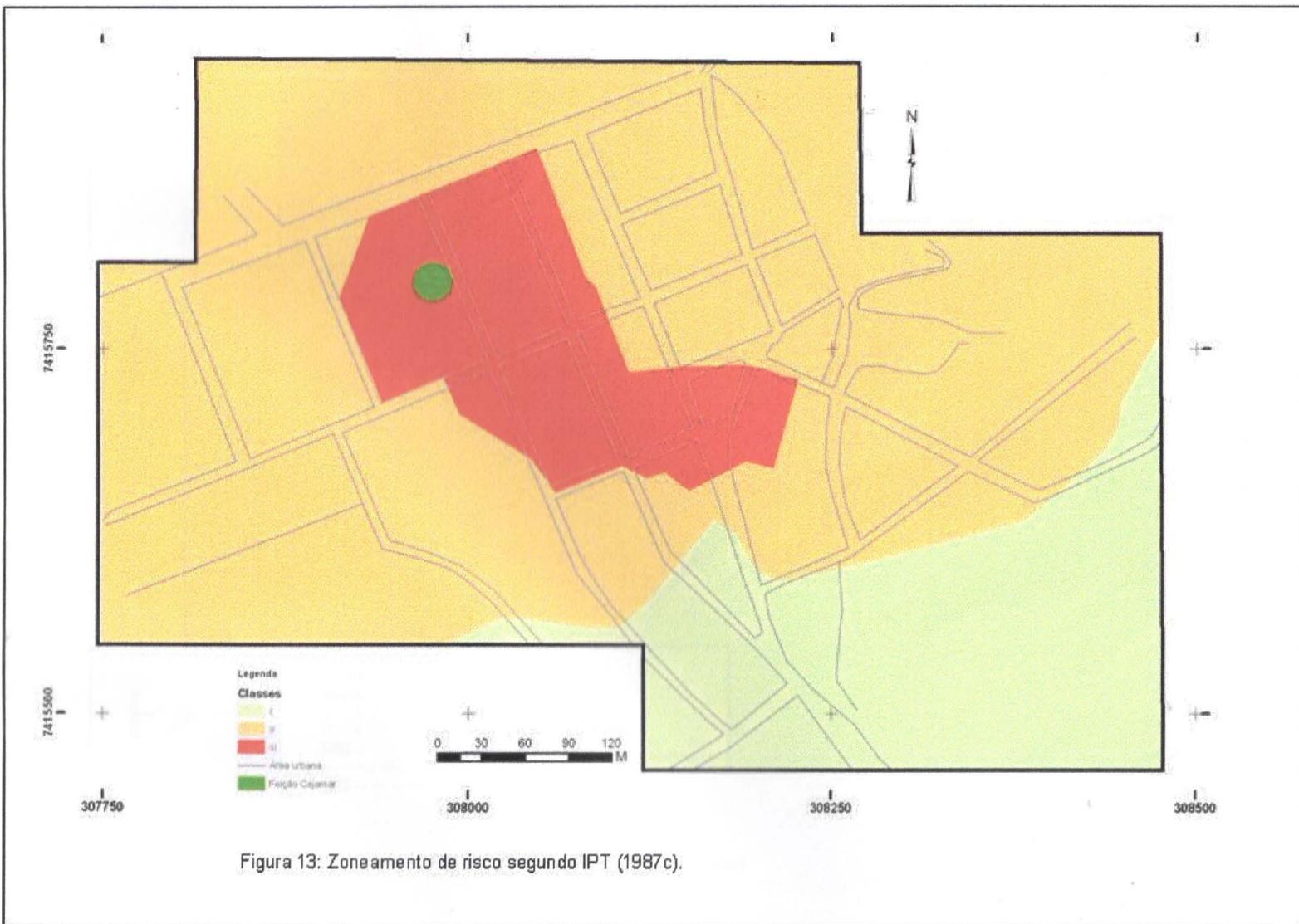


Figura 13: Zoneamento de risco segundo IPT (1987c).



Figura 14: Novo Zoneamento de Risco

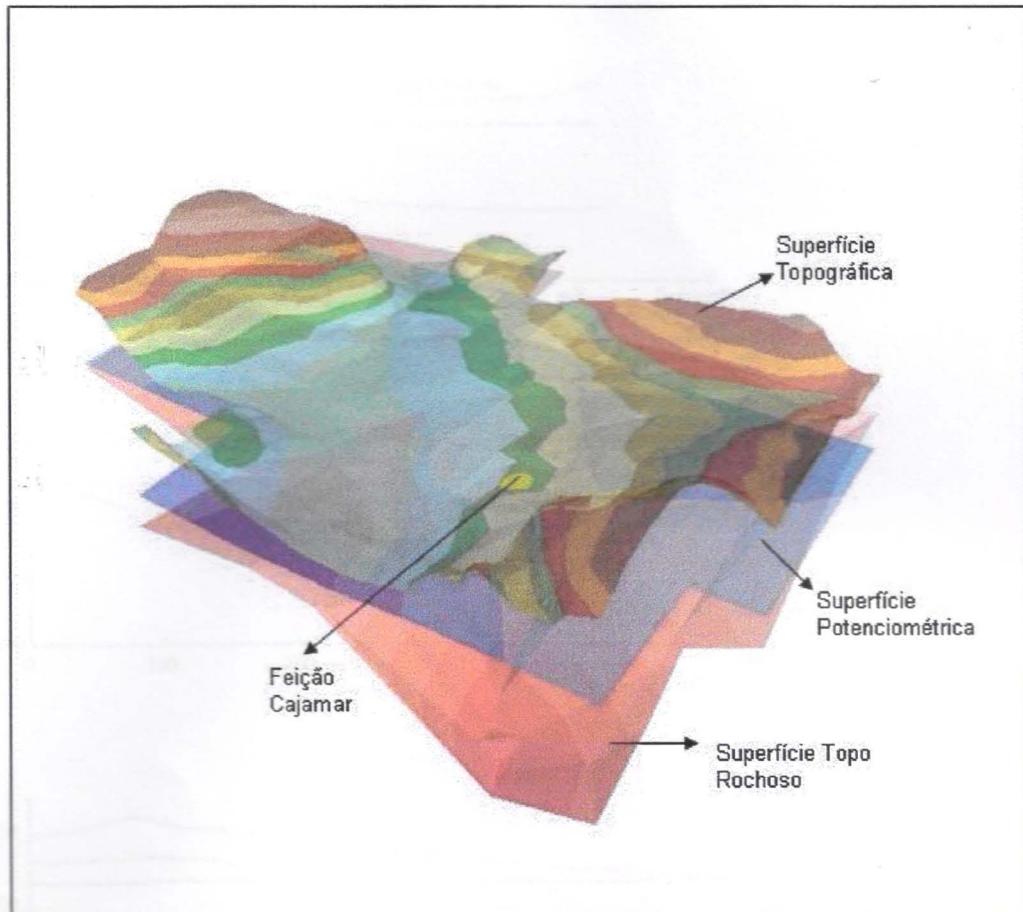


Figura 15: Superfícies tridimensionais sobrepostas

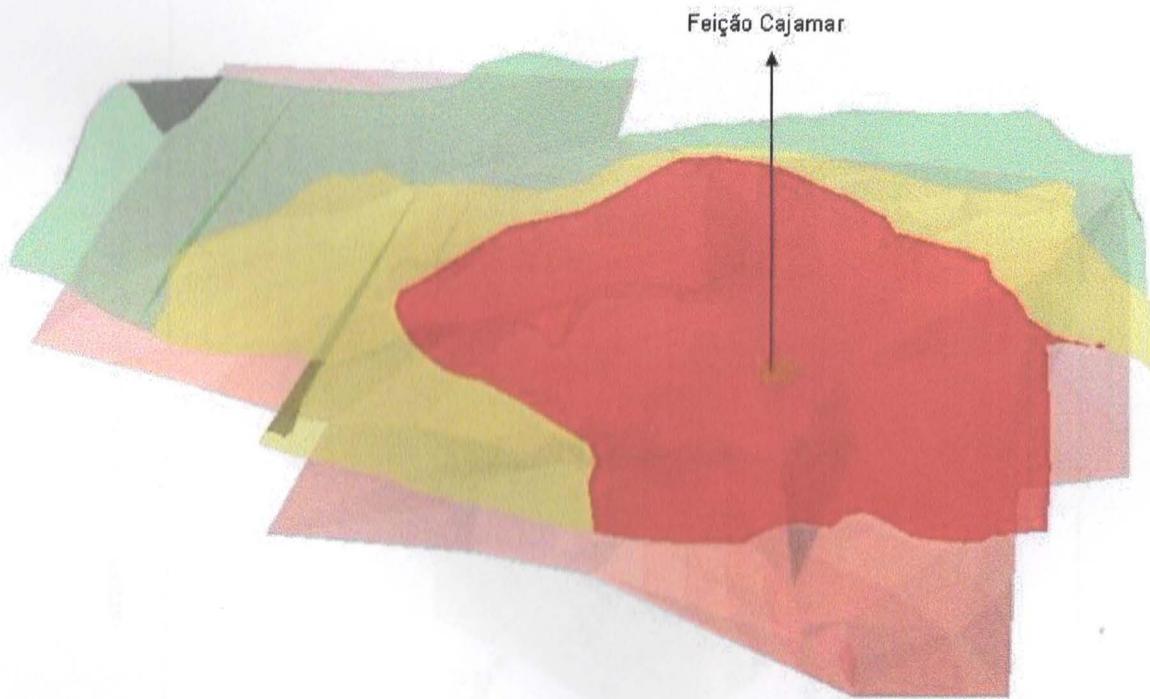


Figura 16: Superfícies tridimensionais para o novo zoneamento de risco e topo rochoso

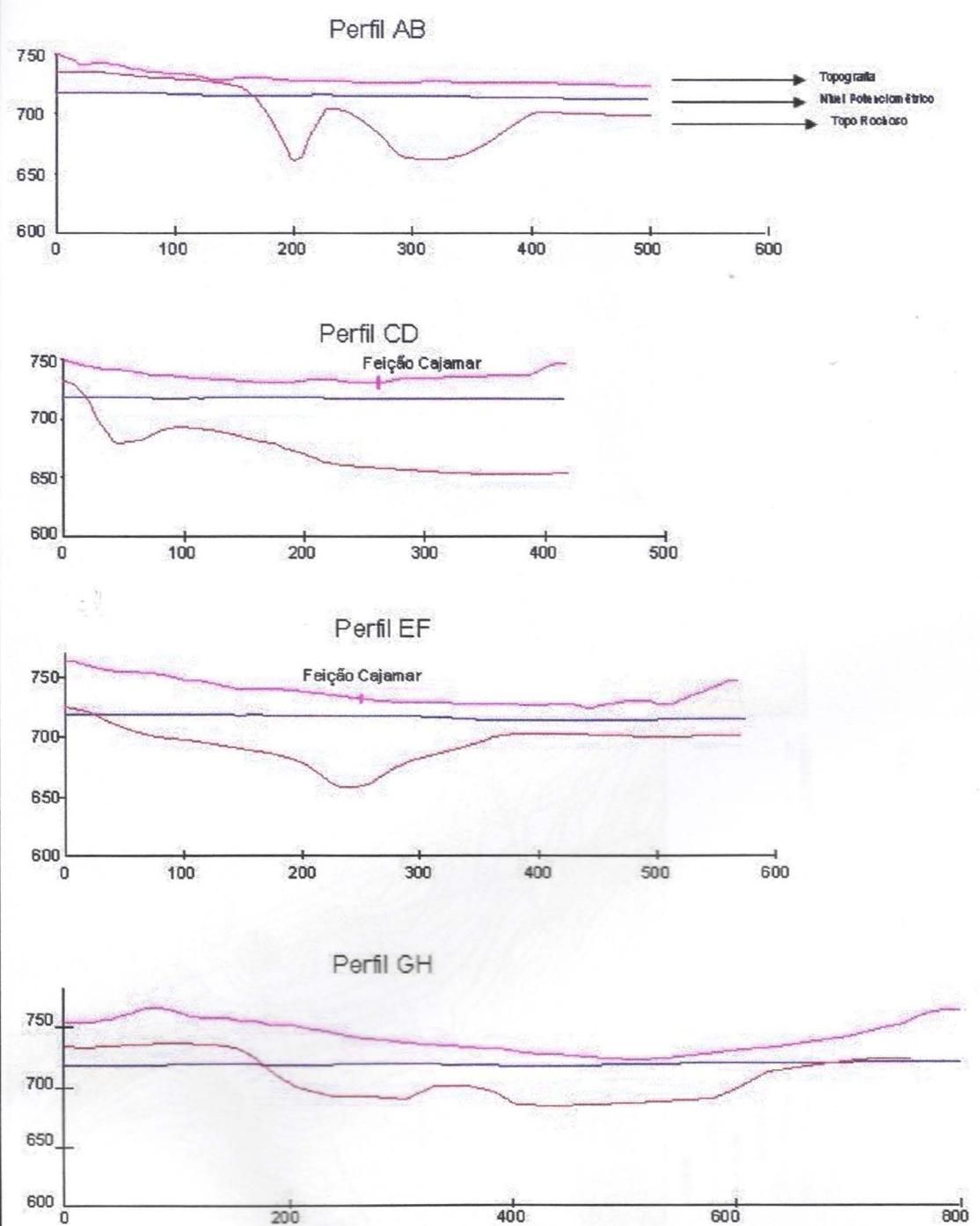


Figura 17: Perfis gerados a partir do cruzamento dos modelos digitais.

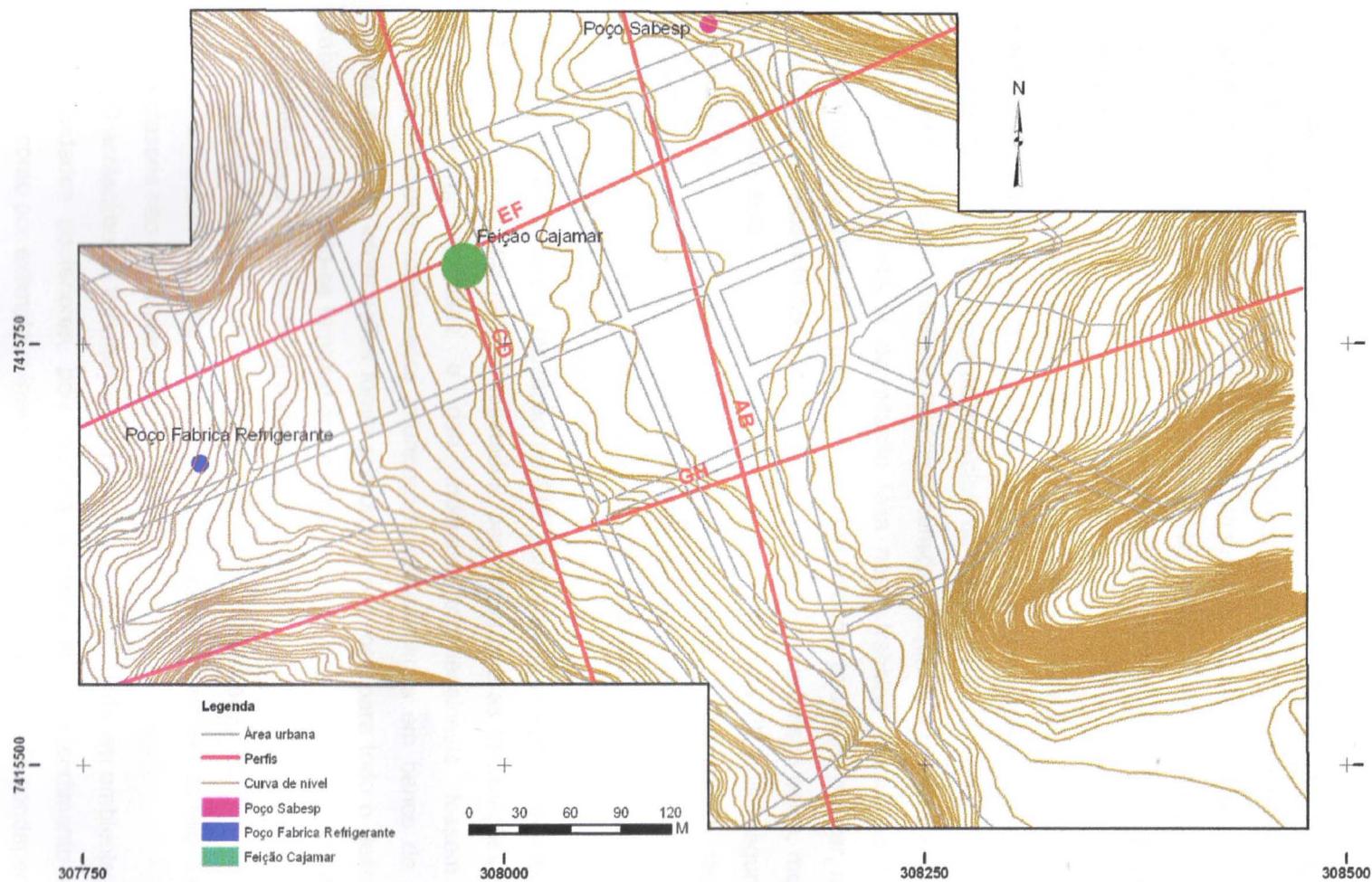


Figura 18: Localização dos perfis.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos do IPT durante os anos de 1986 e 1987 se concentraram no entendimento das características da dinâmica do complexo carbonático de Cajamar e suas características cársticas principalmente através de estudos geomecânicos, geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos para assim delimitar zonas de riscos e estabelecer parâmetros que norteassem a ocupação urbana de Cajamar para se preservar a vida humana.

Assim, entende-se que os trabalhos desenvolvidos pelo IPT se concentraram no entendimento dos processos cársticos, tidos como deflagradores do acidente ocorrido, e na apresentação de uma solução ao município de Cajamar para a sociedade local não viesse a sofrer danos maiores ou mesmo que as dimensões do fenômeno não se expandissem.

Por outro lado, a delimitação feita neste trabalho possui caráter preventivo e predetermina as áreas mais prováveis para um acidente geológico ocorrer, não descartando o risco de um acidente ocorrer na área denominada zona I, risco baixo, mesmo que a sua probabilidade seja extremamente menor do que na zona III, pois, segundo Waltham & Fookes (2003), em uma região carstificada, as variáveis do sistema são interdependentes e consequentemente a classificação por estes autores definida deve ser uma guia para a execução de trabalhos, ao passo que no zoneamento desenvolvido pelo IPT (1987c) a zona I do é considerada desprovida de risco.

A digitalização e a utilização de SIG para a classificação e caracterização do risco geológico, através dos dados resgatados, permitiram que as informações mais relevantes fossem georreferenciadas e que modelos tridimensionais fossem criados e consequentemente todas estas informações armazenadas em banco de dado interativo (anexo A). Estas informações foram primordiais e o foco para todo o desenvolvimento do trabalho, constituindo-se também como uma atividade que não havia sido desenvolvida na época em que o IPT realizou os trabalhos em Cajamar.

Como já foi mencionado anteriormente, a classificação dos arredores urbanos de Cajamar encontram-se entre as classes KII e KIII, porém algumas das feições características destas classes não são observadas.

O acréscimo de informações ao banco de dados criado em ambiente SIG é sugerido para atividades posteriores, pois ajudará a melhorar o entendimento dos processos cársticos, como por exemplo, a inserção pontual das descrições de sondagem realizadas na época para assim como sua interpolação para que aspectos como o fissuramento do topo rochoso do corpo de carbonato possa ser visualizado em detalhe.

A questão da geofísica também pode ser incorporada em trabalhos posteriores, uma vez que Waltham & Fookes (2003) dizem que anomalias geofísicas podem estar

relacionadas a vazios subterrâneos, porém os autores dizem que o melhor método investigativo para este fim é o da microgravidade, técnica não disponível nos trabalhos desenvolvidos pelo IPT.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M.de; HASSUI, Y.; PONÇANO,W.L.; DANTAS, A.S.L.; CARNEIRO, C.D.R.; MELO, M.S. de; BISTRICHI, C.A. 1981 Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000. Nota Explicativa. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Mineração e Geologia Aplicada. São Paulo,.2v.
- ANON, I. 1995. .The description and classification of weathered rocks for engineering purposes: Geological Society Engineering Group Working Party Report. *In:QUARTELY JOURNAL OF ENGINEETING GEOLOGY*. (28) . p.207–242.
- BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J.1974. Engineering classification of rock masses for tunnel design. *In:ROCK MECHANICS*, (6). 189–236.
- BIENIAWSKI, Z.T. ENGINEERING CLASSIFICATION OF JOINTED ROCK MASSES.1973. Transactions of the South African Institute of Civil Engineers, (15) p.335–343.
- CULSHAW, M. G. & WALTHAM, A C. 1987. Natural and artificial cavities as ground engineering hazards. *Quarterly Journal of Engineering Geology* (20), p.139-150.
- FOOKES, P.G., HAWKINS, A.B. 1988. Limestone weathering: its engineering significance and a proposed classification scheme. *In:QUARTERLY JOURNAL OF ENGINEERING GEOLOGY*,(21) p. 7–31.
- FOOKES, P.G.1997.Geology for engineers: the geological model, prediction and performance.*In:QUARTERLY JOURNAL OF ENGINEERING GEOLOGY*, (30). P.293–424.
- FORD, D.C., WILLIAMS, P.F.1989. Karst Geomorphology and Hydrology., Unwin Hyman, London.
- HACHIRO, J.; SANTORO, E. 1996.Uma Provável Bacia Terrígeno-carbonática da Idade Neoproterozóica-eopaleozóica, em Cajamar (SP). *In: ANAIS ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS*, 68 (4), Rio de Janeiro, RJ. Anais... Rio de Janeiro, p.601.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S. A, IPT (1986A) Avaliação da subsidência e colapso dos terrenos de Cajamar. São Paulo, IPT (Relatório nº 24353).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S. A, IPT (1986b) Parecer técnico da United States Geological Survey – Findings and recommendations on sinkhole at Cajamar, São Paulo . São Paulo, IPT (Relatório nº 24438).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S. A, IPT 1986c) Informe técnico à imprensa, elaborado pelo IPT em 01/10/1986, Avaliação da subsidência e colapso nos bairros de Lavrinhas e Vila Branca – Cajamar, São Paulo: Zoneamento de Risco. São Paulo, IPT (Relatório nº 24671).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S. A, IPT (1987a) Caracterização e avaliação do meio físico para o parcelamento do solo: área de Campos, município de Cajamar, São Paulo, IPT (Relatório nº 24623).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S. A, IPT (1987b) Avaliação de desmonte de rocha com explosivos – Pedreira Pires, Cajamar – SP. São Paulo, IPT (Relatório nº 24673).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S. A, IPT (1987c) Diagnóstico do abatimento do terreno em cajamar, SP e definição de modelos e diretrizes para a resolução do problema. São Paulo, IPT. 7 vs. (Relatório 25.053).

JULIANI, C. 1986. Petrogênese do Vulcanismo e Aspectos Metalogenéticos Associados: Grupo Serra do Itaberaba na Região de São Roque (SP). *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 34., Goiânia, GO. Anais... Goiânia: SBG, p. 92-93.

PACHECO, R.M. 2000. Estratigrafia da Bacia de Cajamar (Vendiano-Cambriano), São Paulo (SP). 20p+il+anexos. Monografia (Trabalho de Formatura) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SANTORO, E.; CARNEIRO, C.D.R.; OLIVEIRA, M.C.B. de; HACHIRO, J. 1988 Estrutura Geológica da Região de Cajamar – Jordanésia (SP). *In: REVISTA BRASILEIRA DE GEOCIÊNCIAS* 18 (3). São Paulo, SP. Anais... São Paulo: SBG. p.353-361.

WALTHAM, A C.; FOKES P. G. 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *In: QUARTERLY JOURNAL OF ENGINEERING GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY*, (36), P. 101-118.

WANG, H; YONGXIANG, L; ENZHI, W; ZONGZHUANG Z.1997. Strategic ground water management for the reduction of karst land collapse hazard in Tangshan, China.*In: ENGINEERING GEOLOGY*,(48) p. 135-148.

De acordo,

*Brancalhão*

---

Itamar Brancalhão Júnior

*Ivo Karmann*

---

*Alessandra C. Corsi*

---

Alessandra C. Corsi (IPT)