

A INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE FRATURAMENTOS NO REGIME DE FLUXO EM AQUÍFEROS CÁRSTICOS: um estudo de caso nos municípios de Irecê e Lapão – BA.

Tereza Cristina Bittencourt Nossa¹; Hailton Mello da Silva² & Luiz Rogério Bastos Leal³

Resumo - Este trabalho analisa a relação existente entre os principais sistemas de fraturamentos e as direções de fluxo em aquíferos cársticos Neoproterozóicos da Formação Salitre, situados nos municípios de Irecê e Lapão, localizado na porção central do Estado da Bahia. Nesta região a população depende das águas subterrâneas para consumo humano, dessedentação animal e, principalmente, para a irrigação, devido à pluviosidade irregular e à carência de mananciais superficiais. Sendo assim, é de suma importância a compreensão do comportamento do fluxo no aquífero, bem como as suas variações regionais, uma vez que o sistema de fraturamentos pode auxiliar na definição da geometria do sistema de fluxo subsuperficial regional.

Palavras-chave – Análise das fraturas, aquífero cárstico, fluxo subsuperficial.

Abstract - This work analyses the relationship between the principal systems of fractures and the flowing direction in Neoproterozoic karst aquifer at Salitre Formation, situated within the outskirts of Irecê and Lapão, which is located in the central part of Bahia State. In this region the population depends on groundwater supply for the human and animal use and mainly for irrigation, due to low amount of rainfalls and the lack of superficial flowings. That way is the most important one for the comprehension of the flow behavior in the aquifer, as well as its regional variations, considering that the fracture system may aid in the definition of the underground flow regional system geometry.

Key words – Fracture analyses, karst aquifer, underground flow.

1) Geóloga MSc. da CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) e Doutoranda da UFBA. Av. Ulisses Guimarães, 2862, Sussuarana – CAB, CEP: 41.213-000, Salvador, BA. Fone (71)3230-9977. Fax: (71)3371-4005. E-mail: tbittencourt@sa.cprm.gov.br

2) Professor Adjunto da UFBA, DGGa, Inst. de Geociências, Campus de Ondina, R. Barão de Jeremoabo, s/n. CEP: 40.170-115 hailton@ufba.br

3) Professor Adjunto da UFBA, DGGa, Inst. de Geociências, Campus de Ondina, R. Barão de Jeremoabo, s/n. CEP: 40.170-115 lrogerio@ufba.br

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento das águas subterrâneas é importante, segundo Foster e Hirata (1991), tanto em relação aos aspectos de quantidade, quanto de qualidade. O quantitativo serve para detectar os rebaixamentos de nível da água nos aquíferos, identificar problemas de superexploração, coletar novos dados para melhorar a sua modelagem conceitual e numérica, confirmar a efetividade das medidas de proteção com estabelecimento de vazões máximas explotáveis. Em relação ao qualitativo, busca a compreensão da qualidade natural da água, a coleta de novos dados para melhorar a sua modelagem conceitual e numérica, a avaliação de risco de contaminação e a aferição da efetividade das medidas de proteção da qualidade dessas águas.

Vrba e Soblsek (1988) relata que em meios cársticos, o monitoramento das águas subterrâneas está condicionado a fatores geológicos (densidade do sistema de falhas e fraturas), químicos (dissolução das rochas), geográficos (relevo) e climáticos (temperatura e pluviosidade). Os fatores climáticos são variáveis ou cíclicos, o que provoca uma intermitência na circulação hídrica através das rochas, e consequentemente, uma ação descontínua nas transformações do meio cárstico.

As fendas dutos e fraturas controlam as propriedades de permeabilidade e a mobilidade no reservatório, mas volumetricamente, as feições de dissolução nos carbonatos adquirem maior importância. Diferentemente dos reservatórios constituídos predominantemente de clásticos, com propriedades de permo-porosidade relativamente isotrópicas ao longo de grandes extensões, os reservatórios em relevos cársticos são caracterizados pela anisotropia da permo-porosidade, com grande variação em escala de apenas dezenas a centenas de metros e em diferentes direções Beraldo (2006).

Neste trabalho são apresentados dados preliminares de estudos hidrogeológicos em curso, em uma área formada por parte dos municípios de Irecê e Lapão, no Estado da Bahia com uma área de aproximadamente 250 km² (Figura 1).

A área é constituída por rochas essencialmente carbonáticas (calcilitos, calcissilitos, lamitos algais, margas, calcarenitos e dolomitos) da Formação Salitre de idade Neoproterozóica, caracterizada como paleoambiente deposicional continental e marinho de águas rasas, segundo Bomfim *et al.* (1985). Apresenta feições cársticas bem desenvolvidas, que juntamente com zonas de fraturamento, constituem os reservatórios de maior expressividade do ponto de vista de recepção e armazenamento de águas subterrâneas, formando um sistema misto.

Guerra (1986), verificou que os aquíferos na área apresentam uma hidrodinâmica que permite caracterizá-los como sendo de grande capacidade de recarga e de elevada velocidade de fluxo subterrâneo. Além disso, esses calcários apresentam consistência compacta, por vezes com um certo

grau de metamorfismo, propiciando o desenvolvimento de uma rede fissural, o que confere a estes aquíferos um comportamento misto fissural / cárstico. A pouca profundidade e a sistemática de recarga através de formas de absorção abertas como sumidouros, dolinas e fendas, em que as águas passam diretamente da zona não saturada para a zona saturada sem sofrer os efeitos da filtração natural, predominantes em terrenos sedimentares terrígenos, os tornam extremamente vulneráveis aos contaminantes químicos e biológicos. Dessa forma, nestas áreas a entrada e a difusão dos poluentes em subsuperfície ocorrem de modo rápido e em sentido linear, acompanhando a forma de circulação das águas, preferencialmente através de canais de dissolução e fendas.

Bastos Leal e Silva *et al.* (2004) constataram que a implantação de projetos de irrigação na área a partir de águas subterrâneas tem causado sérios problemas de superexploração dos aquíferos, gerando redução dos níveis de vazão, rebaixamento dos níveis hidrostáticos e colapso na oferta de água para os sistemas de abastecimento e projetos de irrigação.

Dessa forma, foi realizada uma análise entre as principais direções de fraturamentos e de fluxo nos aquíferos cársticos da área para melhor compreender a relação existente entre o condicionamento estrutural e a dinâmica de fluxo, de forma a auxiliar o poder público na implementação de ações que visem a proteção desses sistemas aquíferos.

2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo localiza-se na região central do Estado da Bahia, compreendendo um polígono com uma área total de aproximadamente 250 km², que perfaz parte dos municípios de Irecê e Lapão, delimitado pelas coordenadas 41°46'40'' a 41°54'30'' de longitude Oeste e 11°16'30'' a 11°26'15'' de latitude Sul (Figura 1).

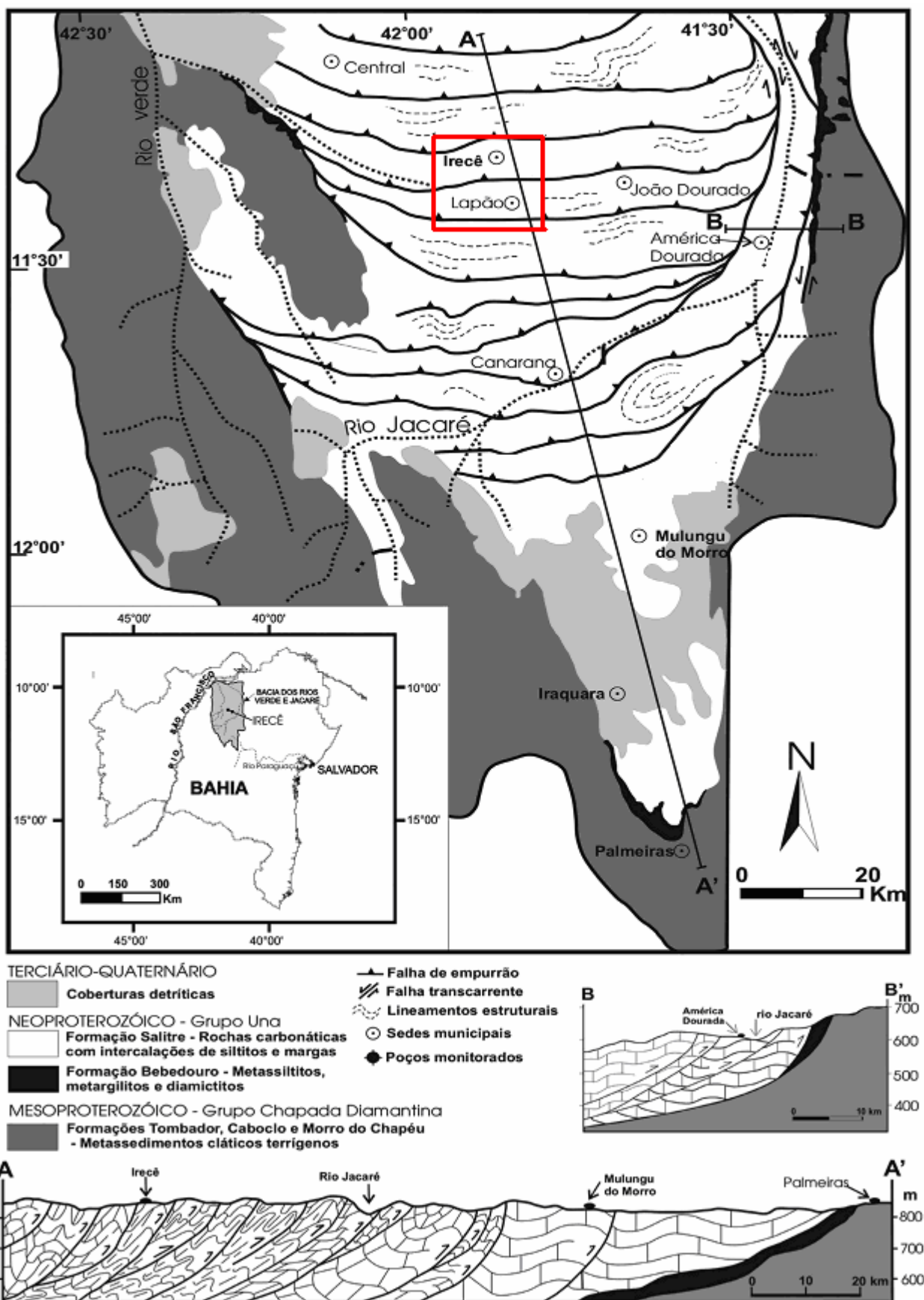


Figura 1: Mapa geológico regional (Ramos, *et. al.*, 2005), com o detalhe do mapa de situação da área.

3. INFLUÊNCIA DAS ESTRUTURAS GEOLÓGICAS NO PROCESSO DE CARSTIFICAÇÃO

Os elementos estruturais, por sua ação modificadora da permo-porosidade das rochas, facilitam a penetração da água no corpo rochoso aumentando a superfície de contato água/rocha e conseqüentemente sua solubilização. Desta forma, segundo Guerra (1986), o processo de carstificação resulta da ação da água sobre a rocha, dissolvendo-a e transportando os produtos solubilizados. A intensidade deste processo depende fundamentalmente do volume e qualidade da água, quanto à acidez; da composição química da rocha, quanto à solubilidade e de fatores geológicos estruturais.

A rupturas que representam as falhas e fraturas em geral, desempenham o papel mais importante dos fatores geológicos no desenvolvimento do carste e no seu comportamento hidrogeológico. Pode-se dizer, segundo Negrão (1987) que, quanto maior for a densidade de fissuras, maior será a ação da água sobre a rocha. As grandes fissuras ou falhas se transformam preferencialmente nos grandes canais de dissolução, por onde circulam as águas subterrâneas, levando inclusive, a carstificação a maiores profundidades. Em subsuperfície, a rede fissural representa as próprias formas embrionárias de absorção, por elas se iniciam, preferencialmente, os processos de carstificação.

O comportamento estrutural condiciona fortemente o comportamento hidrogeológico na área, uma vez que as falhas e fissuras são de fundamental importância tanto nos processos de carstificação como nos processos de recarga, circulação e armazenamento da água. Segundo Guerra (*op. cit.*), sua ação pode atingir grandes profundidades. Normalmente, essas estruturas geológicas se refletem na morfologia da superfície do terreno através de feições típicas do carste, como o alinhamento de dolinas. Os pontos de cruzamento destes alinhamentos são sempre zonas preferenciais de intensa carstificação.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 Etapa de Pré-campo

Consistiu inicialmente na seleção da área de trabalho, com posterior levantamento das informações disponíveis, tanto bibliográficas, como cartográficas. Em seguida, foi realizado o procedimento de fotointerpretação na escala de trabalho, ou seja, 1:25.000 utilizando-se 35 fotografias aéreas monocromáticas.

Em seguida, foi efetuado o georeferenciamento das fotografias aéreas, utilizando-se o software Arc Gis versão 9.2, além de imagens geocover da área e pontos de controle capturados em campo com o GPS (Global Positioning System).

Após as imagens estarem georeferenciadas, foi efetuada a junção das mesmas no software ENVI, gerando o foto mosaico georeferenciado (Figura 2), que serviu de subsídio para a elaboração do Mapa Base da área. Em seguida, foi elaborada uma shape com os poços desativados existentes na área que constam no banco do INGÁ (Instituto de Gestão das Águas e Clima), a qual foi sobreposta ao foto mosaico, de forma a viabilizar a seleção prévia da rede de monitoramento a ser trabalhada.

Desta forma, foram selecionados previamente 36 poços tubulares desativados em uma malha de amostragem bem espaçada em toda a área para medição do nível estático (NE) com um medidor de nível e captura das coordenadas e altitude em cada poço com a utilização de um GPS diferencial (DGPS), para constituírem a rede de monitoramento de trabalho.

4.2 Etapa de Campo

Esta etapa se realizou no mês de abril, final da estação chuvosa na região, de forma a medirmos o NE mais elevado. Outra campanha será realizada na estação seca de forma a efetuarmos a medição do NE mais baixo. Foi realizado um ajuste da rede de monitoramento previamente selecionada, onde alguns poços tiveram que ser substituídos, ora por questões construtivas, ora por estarem obstruídos.

O trabalho consistiu em medições realizadas em cada poço com o GPS diferencial (DGPS) da marca ASHTECH, modelo Promark 2, utilizando-se a base de dados localizada na Estação do IBGE, Base de Irecê, que dista em linha reta aproximadamente 17 km do ponto mais distante medido. A correção das medidas foi feita a partir da aquisição de dados dos dias trabalhados da Estação do IBGE, Base de Irecê, via Internet. Aliado a isso foi medido o NE máximo da água na área com o uso de um medidor de nível d'água, considerando-se a altitude de cada poço em relação à base do terreno.

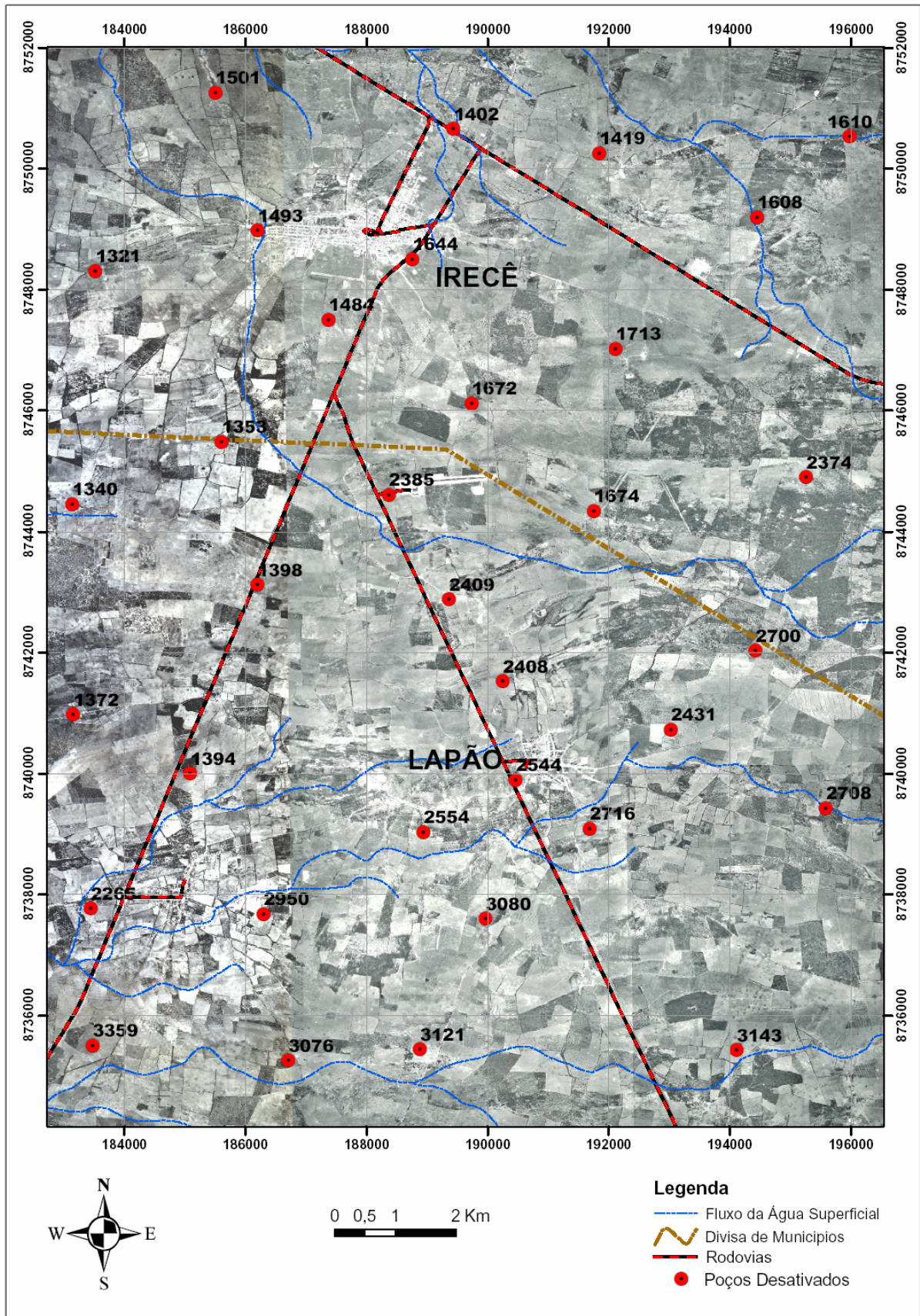


Figura 2: Fotomosaico georeferenciado com os poços tubulares selecionados para a rede de monitoramento.

4.3 Etapa de Pós-Campo

O mapeamento dos sistemas de fraturas da área foi feito a partir de imagens ALOS/AVNIR (resolução espacial de 10m x 10m. Adquirida em 07/02/2007) utilizando-se filtros direcionais do SPRING, desenvolvido por Câmara *et al.* (1996), possibilitando a geração do mapa de densidade de fraturas da área (Figura 10). Alguns sistemas de fraturas, laminações e contatos foram observados e medidos em campo (Figuras 3,4,5 e 6). Em seguida, foram construídos diagramas de rosas para representação das principais fraturas presentes nos municípios de Lapão (Figura 7) e de Irecê (Figura 8) na área, utilizando-se o aplicativo *Azimuth Extension* do ArcView 3.2, da ESRI. Os dados de direções obtidos foram processados pelo software *StereoStat*, da *Rockware*, de onde se obteve os diagramas de rosas usados na interpretação dos resultados.

A diferença entre a altitude da boca do poço no terreno e o NE da água forneceu a carga hidráulica em cada poço. Estes valores foram usados no traçado das isolinhas da superfície potenciométrica, de forma a construir um mapa potenciométrico da área com as principais direções de fluxo subsuperficiais. Para este traçado foi utilizado o software SURFER, versão 8.0. Em seguida, foi utilizada a ferramenta de krigagem do Arc Gis 9.2, para facilitar a sua representação espacial (Figura 11), bem como um bloco diagrama com a superfície potenciométrica, também gerada no SURFER, versão 8.0 (Figura 13). Em seguida, as principais fraturas (Figura 10), foram analisadas com as principais direções de fluxo (Figura 11), gerando o mapa potenciométrico com densidade de fraturas da área (Figura 12).



Figura 3: Contato de direção aproximadamente E-W entre calcarenitos e calcilititos laminados na Fazenda Aliança, município de Lapão.

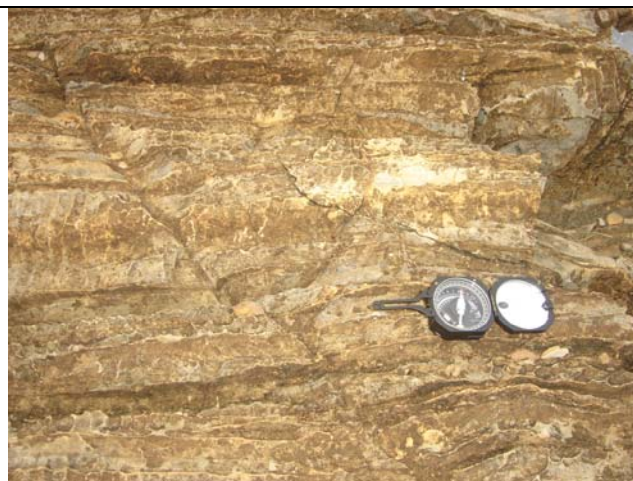


Figura 4: Fraturas de direção NW/SE, com foliação de direção aproximada E/W, município de Irecê.



Figura 5: No detalhe, boudans preenchidos provavelmente por calcita em áreas de alívio de pressão em calcarenitos com laminação de direção E-W aflorantes na Fazenda Aliança, município de Lapão.

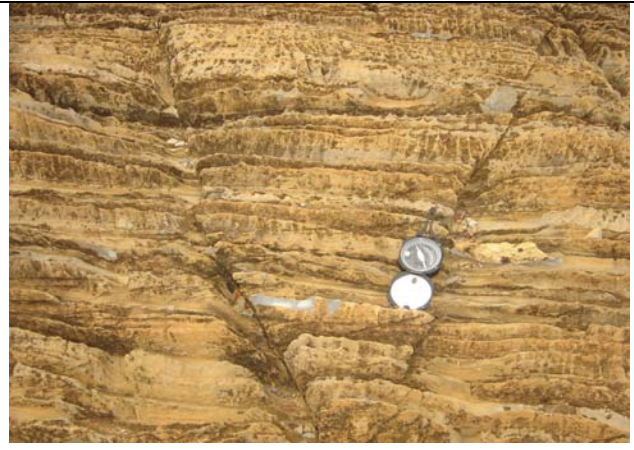


Figura 6: Par conjugado de fraturas de direção NW/SE e NE/SW na Fazenda Aliança, município de Lapão.

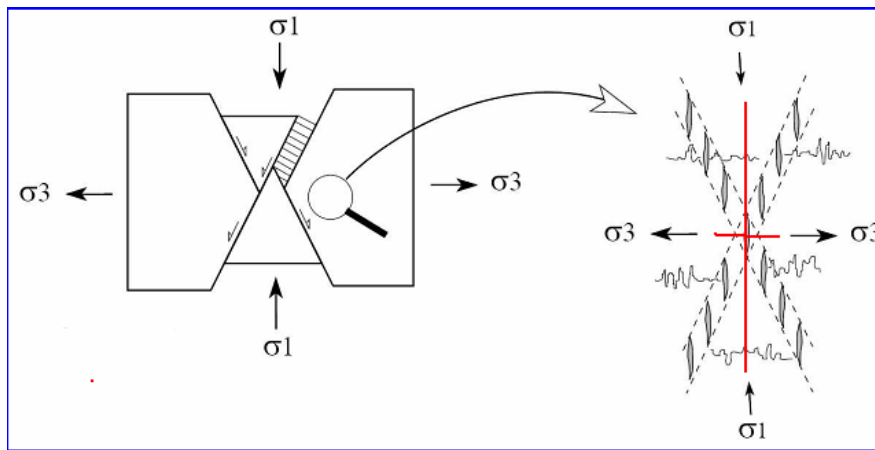


Figura 7: Diagrama representativo com os principais esforços (σ_1) geradores do movimento do par conjugado de falhamentos e os esforços de alívio de tensão (σ_3).

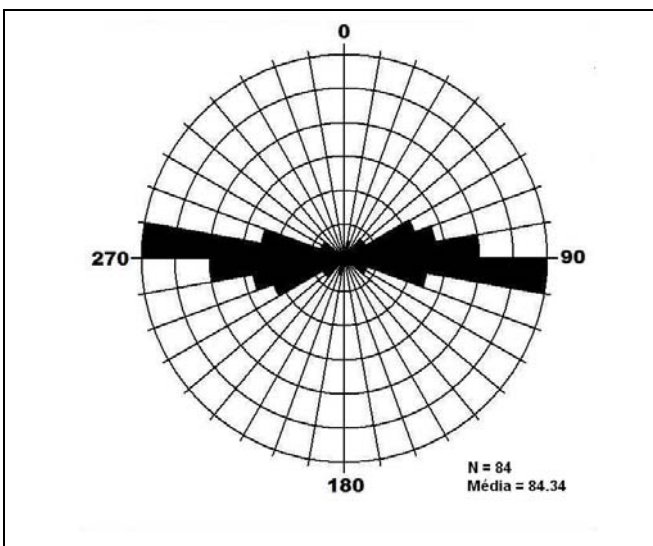


Figura 8: Diagrama de rosas representativo de fraturas do município de Lapão.

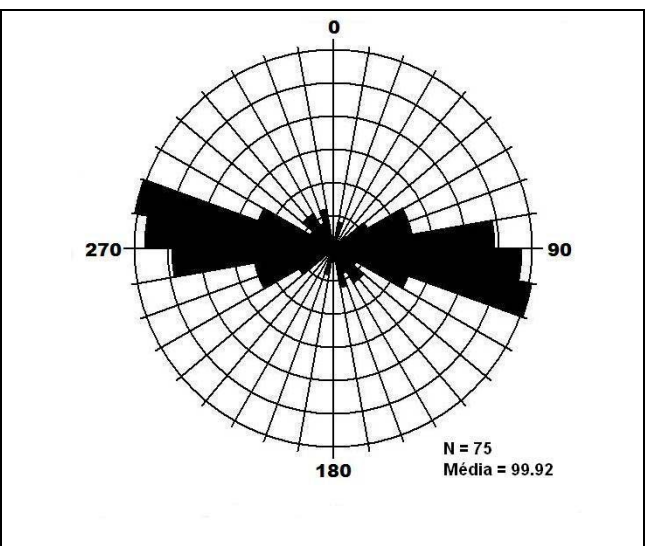


Figura 9: Diagrama de rosas representativo de fraturas do município de Irecê.

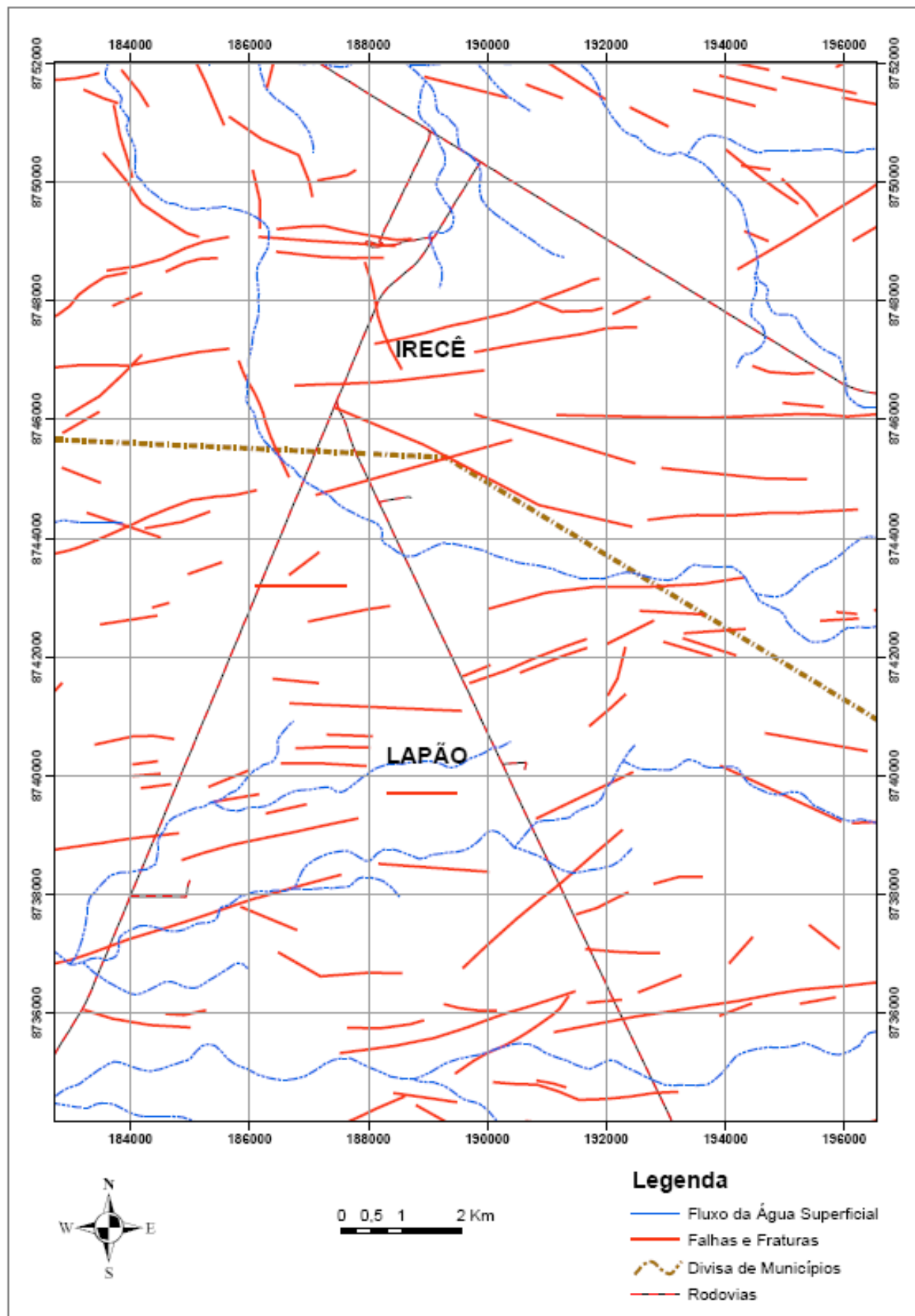


Figura 10: Mapa de densidade de fraturas.

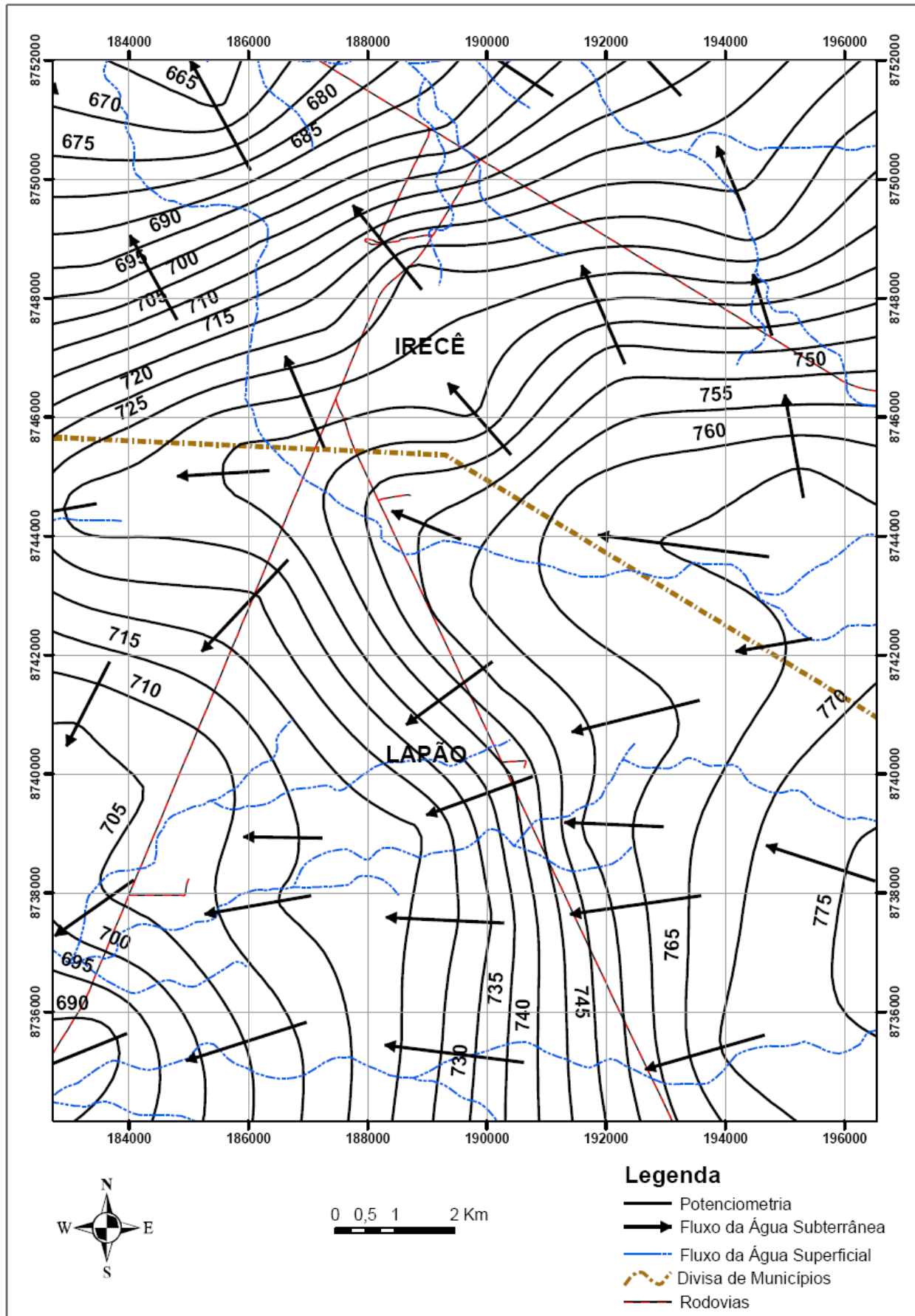


Figura 11: Mapa potenciométrico com as principais direções de fluxo.

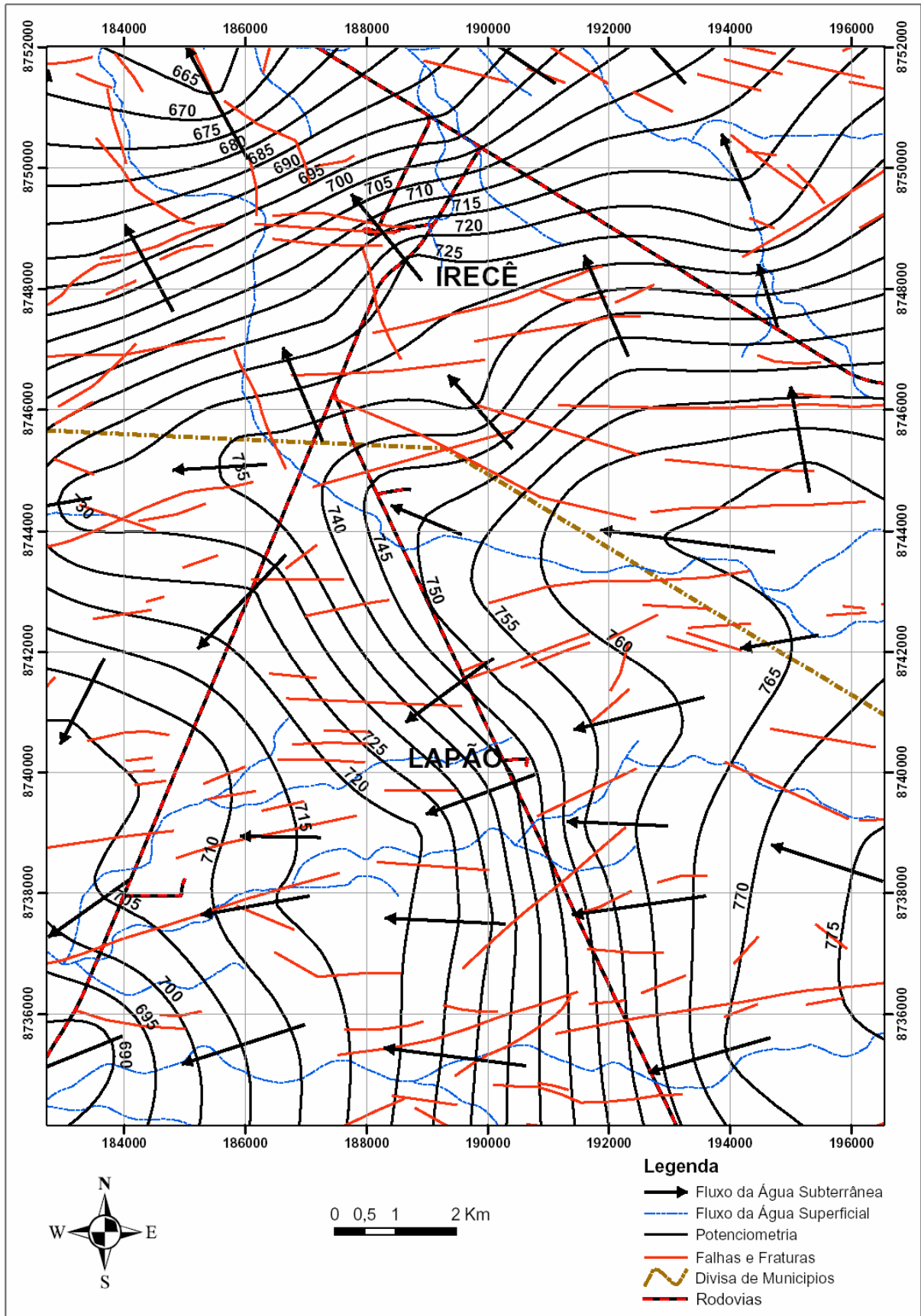


Figura 12: Mapa potenciométrico com as principais direções de fraturas e de fluxo.

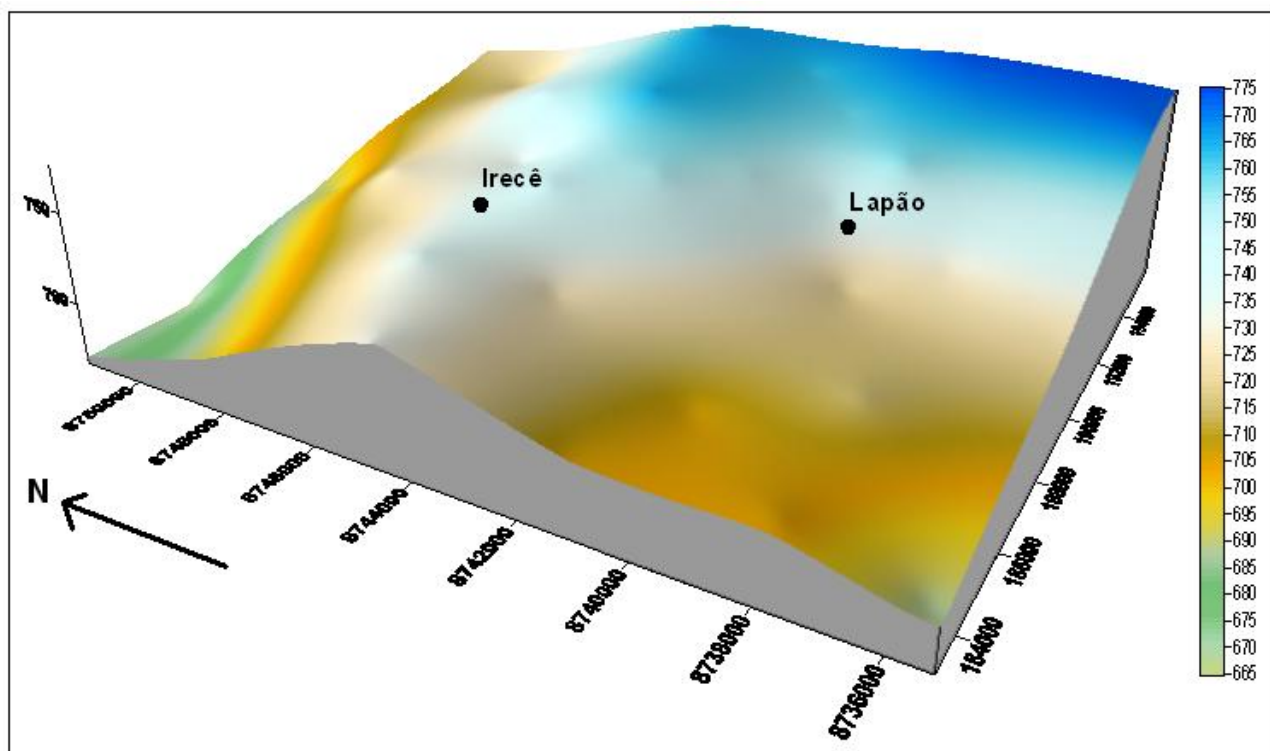


Figura 13: Bloco diagrama representativo da superfície potenciométrica.

5. DISCUSSÃO

O mapa de densidade de fraturas (Figura 10), foi elaborado com base em 159 direções de fraturamentos e demonstra que a rede de drenagem principal coincide com as direções de fraturamentos mais significativos em toda a área, predominando a direção E/W.

No setor sul, município de Lapão observa-se em alguns locais a formação de feições cársticas bem desenvolvidas, como sumidouros (Figura 14) e fraturas abertas (Figura 15), onde as direções de fraturamentos principais predominam na direção NE/SW, entre $N60^\circ$ e $N90^\circ$, com uma média na direção $N84^\circ$ e, secundariamente, entre $N90^\circ$ e $N110^\circ$, muito próximas da direção E/W (Figura 8).

No setor norte, município de Irecê, a rede de drenagem principal também coincide com os principais sistemas de fraturas de direção E/W, muito próximos de 90° , predominando a direção NW/SE, entre $N90^\circ$ e $N120^\circ$, com uma média na direção $N100^\circ$ e, secundariamente, entre $N60^\circ$ e $N90^\circ$ (Figura 9).



Figura 14: Sumidouros em calcarenitos e calcilutitos na Fazenda Aliança, município de Lapão.



Figura 15: Fraturas abertas de direção NW/SE na Fazenda Juá, zona urbana da cidade de Lapão.

As fraturas abertas (Figuras 7) nas direções N-S entre 0° e 10° , E-W entre $N70^{\circ}$ e $N100^{\circ}$ e NW-SE entre $N120^{\circ}$ e $N130^{\circ}$, controlam as direções preferenciais das cavernas e demais estruturas de dissolução que ocorrem na área (Figura 14 e 15).

O processo de carstificação é mais desenvolvido no setor sul, município de Lapão (Figuras 14 e 15). No setor norte, correspondente ao município de Irecê, o processo de carstificação não é tão desenvolvido. Neste caso, as fraturas constituem-se nas principais formas de absorção e armazenamento (Figura 4). Desta forma, predomina no aquífero um comportamento fissural.

5. CONCLUSÕES

A evolução do processo de carstificação na área é condicionada fortemente pelos elementos estruturais, ou seja, os fraturamentos (Figura 12), que coincide com a análise regional de densidade de fraturamentos em toda a Bacia de Irecê, obtida por Guerra (1986);

A influência dos elementos fissurais foi observada em toda a área, com predomínio da direção E/W, variando localmente em ângulos próximos nas direções NE/SW e NW/SE, apresentando uma média de fraturamentos no município de Lapão correspondente à direção $N84^{\circ}$ para NE/SW (Figura 8) e $N100^{\circ}$ para NW/SE no município de Irecê (Figura 9), o que corrobora a direção de fraturamentos regional E/W;

As direções de fluxo no aquífero ocorrem preferencialmente na direção E/W, em conformidade com a direção de fluxo e densidade de fraturamentos regional de acordo com Guerra (*op. cit.*). Localmente, observam-se direções preferenciais de fluxo no município de Lapão NE/SW e no município de Irecê NW/SE (Figura 11), também em concordância com as direções preferenciais de fraturamento nestes municípios (Figura 12);

As formas de absorção bem desenvolvidas como sumidouros e fendas, observadas no município de Lapão (Figuras 14 e 15), asseguram boas condições de recarga e refletem em subsuperfície as formas de circulação e armazenamento;

Os elementos fissurais constituem-se nas formas primárias de recarga, armazenamento e circulação hídrica no município de Irecê, onde os processos de carstificação ainda não se instalaram integralmente.

AGRADECIMENTOS

À CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) da Bahia pelo apoio logístico fornecido ao trabalho.

BIBLIOGRAFIA

ALOS/AVNIR. <http://www.ibge.gov.br/alos/sensores.php>. Acessado em 13.05.2009.

BASTOS LEAL, L. R., SILVA, H. P. da. (Coord.) (2004). “*Modelização da dinâmica hidrológica e instrumentos para a gestão do sistema aquífero-rio das bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré – região semi-árida do Estado da Bahia*”. Relatório técnico final do convênio de cooperação técnico-científica celebrado entre a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia e a Universidade Federal do Estado da Bahia. 435p.

BERALDO, V. J. (2006). “*Avaliação macroscópica das feições cársticas da Formação Salitre na folha Irecê (SC.24-Y-C-I) como reservatórios para água subterrânea.*” Anais: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Curitiba.

BOMFIM, L. P. C., ROCHA, A. J. D., PEDREIRA, A. J., MORAIS FILHO, J. C. de, GUIMARÃES, J. T., TRSCH, N. A. (1985). “*Projeto Bacia de Irecê: Relatório Final.*” Salvador: CPRM. Convênio CPRM-SME.

CAMARA, G., SOUZA, R.C.M., FREITAS UM, GARRIDO, J. (1996). “*SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling*” . Computers & Graphics. 20: (3) 395-403.

ESRI. <http://arcscripsts.esri.com>. Acessado em 18.05.2009

FOSTER, S. S. D., HIRATA, R. C. A. (1991). “*Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: una metodología basada en datos existentes.*” CEPIS, 81p.

GUERRA, A. M. (1986). “*Processos de carstificação e Hidrogeologia do Grupo Bambuí na Região de Irecê – Bahia*”. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. USP.

IBGE. <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmcpesq.shtm?c=9>. Acessado em 20.04.2009.

NEGRÃO, F. I. (1987). “*Caracterização hidrogeoquímica e vulnerabilidade do sistema hidrogeológico cárstico da região de Irecê-Bahia*”. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 86p.

RAMOS, S. O. (2005). “*Variações sazonais dos níveis hidrostáticos do aquífero cárstico da região de Irecê, Bahia: implicações para estimativa da recarga*”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. 117p.

ROCKWARE. <http://www.rockware.com/product/overview.php?id=121>. Acessado em 25.05.2009.

VRBA J., SOBLSEK P. (1988). “*Groundwater monitoring*”. En *Geology and Environment International Manual in three volumes*. UNESCO. UNEP.