

# ROCHA PIROCLÁSTICA FÉLSICA ORIGINADA DE ERUPÇÃO SUBAQUÁTICA NA BACIA SEDIMENTAR DO ESPÍRITO SANTO: UMA ASSOCIAÇÃO COM O MODELO TECTONO-SEDIMENTAR

Akihisa MOTOKI <sup>1</sup>, Luís Carlos Chaves NOVAIS <sup>2</sup>, Susanna Eleonora SICHEL <sup>3</sup>,  
José Luiz Peixoto NEVES <sup>1</sup>, José Ribeiro AIRES <sup>4</sup>

(1) Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (DMPI/UERJ). Rua São Francisco Xavier 524, Sala A4023 – Maracanã. CEP 20550-990. Rio de Janeiro, RJ. Endereço eletrônico: rochasornamentais@yahoo.com.br.

(2) Ativo de Produção Norte Capixaba, Unidade Espírito Santo (ATP-NC, UN-ES), Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS). BR 101 Norte, km 67, 5 – Bairro Morada do Ribeirão. CEP 29930-000. São Mateus, ES. Endereço eletrônico: novais@petrobras.com.br.

(3) Departamento de Geologia, Universidade Federal Fluminense (UFF). Avenida Litorânea, s/n, 4º andar – Gragoatá. CEP 24210-340. Niterói, RJ. Endereço eletrônico: susanna@igeo.uff.br.

(4) Abastecimento, Petróleo Brasileiro S.A. (ABAST, PETROBRAS). Avenida República do Chile, 65, sala 902 – Centro. CEP 20031-912. Rio de Janeiro, RJ. Endereço eletrônico: aires@petrobras.com.br.

Introdução  
Metodologia  
Modelo Tectono-Sedimentar  
Descrições de Campo  
Observações Microscópicas  
Modo de Ocorrência Geológica  
Processo de Erupção Vulcânica  
Possibilidade de Diques Piroclásticos  
Magmatismo e Tectonismo Regional  
Conclusões  
Agradecimentos

**RESUMO** – Este trabalho apresenta a primeira descrição de afloramentos de rochas piroclásticas que ocorrem formando pequenos corpos extrusivos na Bacia Sedimentar do Espírito Santo. Os afloramentos observados mostram corpos tabulares horizontais, com espessura aproximada de 5 m e extensão máxima de 200 m. Os corpos riolíticos estão intercalados entre as camadas areníticas da formação flúvio-lacustre do Rio Doce, de idade Paleoceno a Mioceno Inferior. As observações microscópicas apresentam fenocristais de quartzo da fase alfa, e pequenos fragmentos de quartzo, sugerindo atividade vulcânica explosiva. A matriz é intensamente devitrificada por sericitização e silicificação, devido à reação hidrotermal entre os fragmentos de vidro vulcânico e a água lacustre. Este magmatismo riolítico é uma fonte do calor que tem possível relação com o sistema de fraturas regionais NNW-SSE, com variações para NW-SE, denominado Alinhamento Colatina, que pode ter importância para a formação de jazidas petrolíferas. Este é a primeira informação sobre magmatismo félsico do Cenozóico na região emersa do Espírito Santo, e a primeira do depósito originado de erupção subaquática de composição riolítica no Brasil continental.

**Palavras-chave:** Riolito, erupção subaquática, hidrotermalismo, Formação Rio Doce, Bacia do Espírito Santo.

**ABSTRACT** – A. Motoki, L.C.C. Novais, S.E. Sichel, J.L.P. Neves, J.R. Aires – *Felsic pyroclastic rock originated from subaqueous eruption in the Espírito Santo sedimentary basin: an association with the tectonic-sedimentary model.* This paper presents the first outcrop description of rhyolitic pyroclastic rocks that constitute small extrusive rock bodies in the Espírito Santo Sedimentary Basin. The observed outcrops show horizontal tabular rock bodies, about 5m thick, with horizontal extension less than 200 m. The rhyolitic bodies are intercalated in Paleogene fluvial and lacustrine sandstone layers of the Rio Doce Formation. The microscopic observations exhibit a-phase quartz phenocrysts and small quartz fragments, suggesting explosive volcanic activity. The matrix is intensely devitrified by sericitisation and silicification due to hydrothermal reaction between hot glass shard and lacustrine water. This rhyolitic magmatism is a heat source, which has possible relationship to the NNW-SSE regional fracture system, with variation to NW-SE, the so-called Colatina Lineament, which seems to be important for petroleum deposits formation. This is the first information of Cenozoic felsic magmatism of the onshore region of Espírito Santo, and the first report of subaqueous rhyolitic deposit originated from pyroclastic eruption in continental Brazil.

**Keywords:** Rhyolite, subaqueous eruption, hydrothermalism, Rio Doce Formation, Espírito Santo basin.

## INTRODUÇÃO

A Bacia Sedimentar do Espírito Santo apresenta diversos registros de atividades vulcânicas e intrusivas desde o início de sua formação. Os magmatismos se

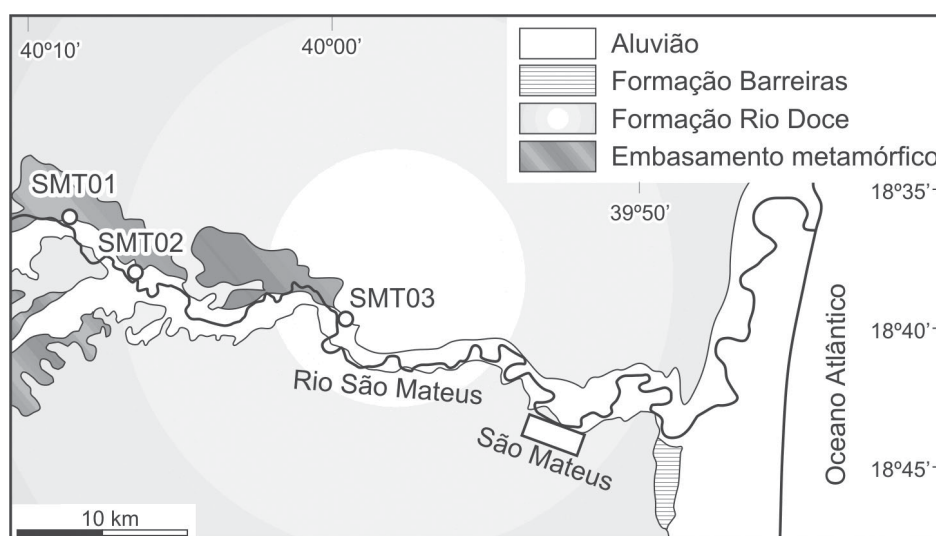
tornaram conhecidos desde a década de 1960 principalmente através de poços de petróleo perfurados pela PETROBRAS. Os principais registros são encon-

trados nas formações Cabiúnas, do Eocretáceo e Abrolhos, do Paleogeno. Esta última está presente na proximidade da zona de fratura Vitória-Trindade, formando o Complexo Vulcânico de Abrolhos. A geração desses magmas tem íntima relação com o processo de tectônico distensiva que causou a ruptura do Continente Gondwana Ocidental e a abertura do Oceano Atlântico e conseqüente formação das bacias sedimentares do Espírito Santo, Campos, Taubaté, Resende, São Paulo (p. ex.: Ricommini, 1997; Ricommini et al., 2004).

O embasamento metamórfico da Bacia do Espírito Santo apresenta sistemas de fraturas relacionados às zonas de cisalhamento com direções preferenciais de N10-N30W, que correspondem ao Alinhamento Vitória-Ecoporanga (Silva, 1987), Faixa Cataclasada Colatina (Cunha, 1987) ou Faixa Colatina (Novais et al., 2003; 2006). Esse sistema estrutural, com eventuais variações para a direção NW-SE, ocorre em toda extensão dessa bacia sedimentar e tem possível influência nos magmatismos não somente neoproterozóicos, como também mesozóicos e cenozóicos. As fraturas dessas direções apresentam influência também nos tectonismos recentes, como indicado pela rede de drenagem atual.

A existência de vulcanismo félsico nas bacias sedimentares do Espírito Santo, Cumuruxatiba e Mucuri, estas duas na região sudeste do Estado da Bahia, era conhecida através dos dados de poços marítimos e terrestres. Conceição et al. (1994) descreveram as rochas vulcânicas sobrepostas nos paleossolos oriundos da Formação Mariricu, Membro Mucuri, da idade aptiana em poços terrestres da PETROBRAS (1-LBM-1-ES e 1-FSL-1-ES) onde há predomínio de derrames da Formação Cabiúnas, do Eocretáceo. A ocorrência rocha vulcânica na região continental foi relatada por Cunha (1987) em um afloramento na BR-101, a norte do Rio Mucuri. Este corpo, de possível composição riolítica, ocorre como intercalação presente na Formação Rio Doce.

A relação entre os sistemas de fraturas e os magmatismos da Bacia Sedimentar do Espírito Santo é um importante tema para a geologia do petróleo. O presente trabalho relata os resultados preliminares de estudos de campo recentemente realizados, que revelaram a ocorrência de rochas piroclásticas de composição riolítica, possivelmente de idade paleogênica, depositadas em ambiente subaquático no norte da Bacia do Espírito Santo, no trecho entre São Mateus e Nova Venécia (Figura 1).



**FIGURA 1.** Mapa de localização dos afloramentos observados da região de São Mateus-Nova Venécia, ao longo do Rio do Norte, um braço do Rio São Mateus.

## METODOLOGIA

As análises estruturais dos sistemas de fraturas de *lato sensu* foram realizadas com base nos alinhamentos encontrados no embasamento metamórfico pré-cambriano e nas coberturas sedimentares cenozóicas, que formam a rede de drenagem atual desta bacia sedimentar. Os elementos são identificados por meio

de mapas topográficos do IBGE (nas escalas 1:1.000.000), fotografias aéreas (escala 1:50.000), imagens de satélites (Miranda & Coutinho, 2004). O modelo estrutural elaborado com base nesses dados de domínio público foi conferido com as observações dos afloramentos. A influência das estruturas nos

magmatismos foi estudada com o auxílio dos perfis de poços, seções sísmicas, mapas gravimétricos e

magnéticos, também de domínio público, junto com os dados de campo.

## MODELO TECTONO-SEDIMENTAR

Os trabalhos anteriores confeccionaram um modelo tectono-estrutural para a Bacia Sedimentar do Espírito Santo. Encontra-se um sistema transtensivo de zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais na porção sul e um sistema transpressivo de zonas de cisalhamento sinistrais na porção norte. Ambos têm direção preferencial N10° a cerca de 30°W, com variações locais de NW-SE. São considerados como uma manifestação do tectonismo de colisão continental brasileira do Neoproterozóico. As zonas de cisalhamento acima citadas são interceptadas por falhas mais jovens, neoproterozóicas, com direção preferencial de N-S a N10E, chamadas de Sistema Cedro Rio Doce (Vieira, 1998). Neste embasamento metamórfico ocorreram intrusões de rochas neoproterozóicas, tais como granito e gabro, e fanerozóicas, dolerito e basalto. Os elementos citados apresentam uma ampla influência na sedimentação, compartimentação da bacia sedimentar e controle do sistema hidrodinâmico.

O estudo das zonas de cisalhamento tem sido promovido com objetivo de esclarecer a relação entre pulsos de hidrotermalismo e mineralizações associadas, como indicador de circulação de fluidos. Estes eventos também propiciam a formação das fraturas condutoras de fluídos em direção transversal ao eixo principal da bacia sedimentar, sendo responsáveis pelo transporte de hidrocarbonetos a partir das porções profundas da

bacia para a borda, onde podem concentrar-se extensas redes de fraturas com altas permeabilidades. Esses sistemas têm papel fundamental no controle das deposições das Formações Rio Doce e Barreiras, com atividades neotectônicas, representadas pela formação de falhas com rejeitos direcionais.

A Formação Rio Doce é importante para o ambiente de deposição da rocha piroclástica em discussão. Essa formação foi descrita e datada por Asmus et al. (1971) através dos fósseis obtidos em poços perfurados na porção marítima. É composta principalmente de arenito arcoseano de granulometria grossa e parcialmente de rochas conglomeráticas com seixos de 2 a 3 cm, com eventuais intercalações de camadas descontínuas de argilito verde. Os materiais constituintes são imaturos, como indica a abundância de feldspato. A idade da sedimentação foi cenozóica, entre o Paleoceno e o Eomioceno.

O modelo sedimentar proposto para a Formação Rio Doce é de fluxos detríticos continentais de alta densidade. Seus sedimentos integram um ambiente de leques aluviais associados a rios entrelaçados, com acompanhamento eventual de pequenos sistemas lacustres rasos. A sedimentação ocorreu sob influência das zonas de cisalhamento NWN-SSE a NW-SE. Nas porções distais estes sedimentos continentais interdigitam-se com carbonatos de plataforma rasa da Formação Caravelas.

## DESCRIÇÕES DE CAMPO

A região pesquisada é coberta por espesso regolito e densa floresta tropical, encontrando-se poucos afloramentos isoladamente. As exposições relativamente favoráveis estão limitadas às beiras do Rio São Mateus e seus afluentes, o que requereu trabalhos de campo por meio de navegação.

Foram descritos três afloramentos. O primeiro, SMT01, situa-se na beira norte do Rio do Norte, Fazenda São José (Figura 1). A rocha cobre o embasamento paragnáissico do Pré-Cambriano do Domínio Costeiro (Heilbron et al., 2000) e é coberto pelas camadas areníticas flúvio-lacustres da Formação Rio Doce (Asmus et al., 1971; Milani et al., 2000). A exposição tem uma extensão horizontal de 10 m e vertical de 1 m (Foto 1 da Prancha 1). Observam-se fraturas subverticais pouco desenvolvidas de intervalo de 20 a 50 cm. Cerca de 200 m a jusante, ocorre um

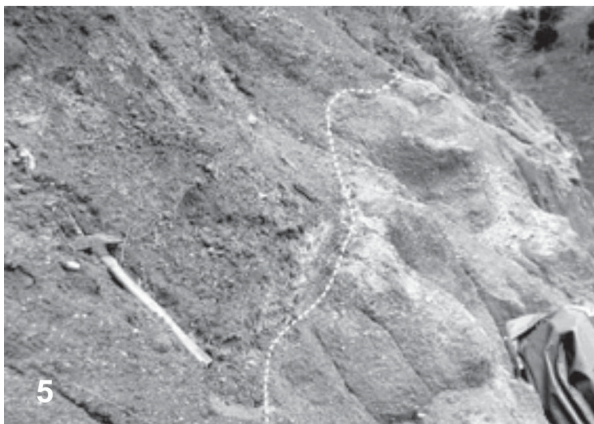
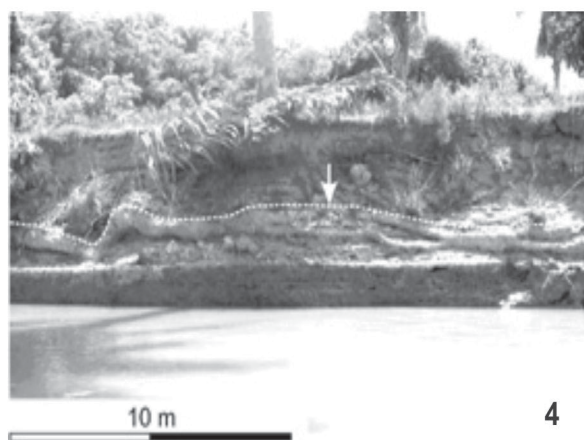
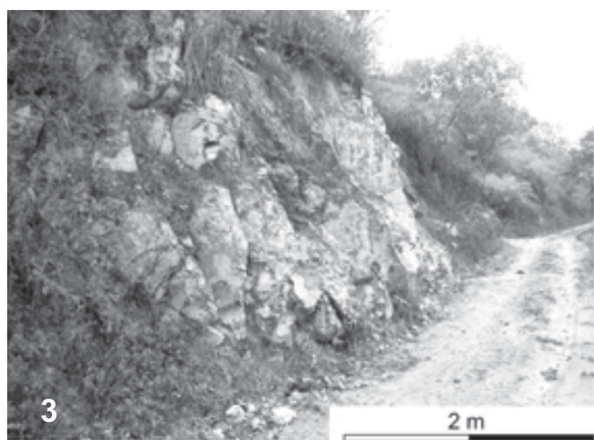
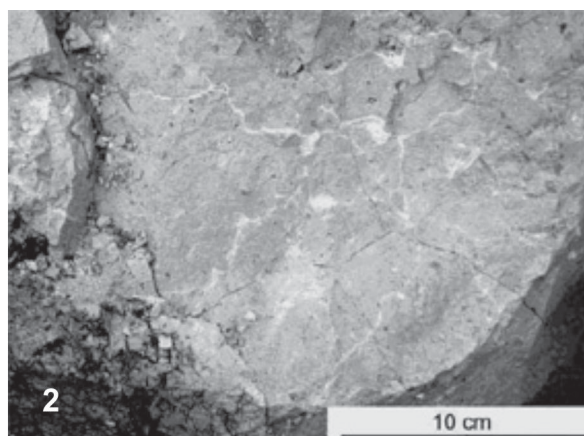
afloramento extremamente intemperizada desta rocha e da rocha metamórfica. Não há exposição de rocha similar em torno desses. O modo de ocorrência acima citado sugere que este corpo tem forma tabular de configuração subhorizontal, com espessura em torno de 5 m.

A vista desarmada e sob lupa, observam-se grãos de quartzo de forma geral fragmentados e de tamanho máximo de 2 mm. Não se observam grãos de outros minerais. A matriz tem cor cinza-clara e textura maciça, sem estruturas orientadas. Na superfície do afloramento, encontra-se uma feição peculiar de fraturas irregulares de textura parecida a rede, com largura de 5 mm a 1 cm e espaçamento de 5 a 10 cm, preenchidas por material branco sugestivo de calcedônia (Foto 2 da Prancha 1).

O segundo afloramento, SMT02, ocorre na escarpa norte na Fazenda Boa Vista, ao longo do Rio do Norte,

apresentando uma rocha similar a SMT01. Ela é exposta na escarpa vertical com extensão de 15 m e altura de 3 m. Observam-se fraturas subverticais mal desenvolvidas, espaçadas de 50 cm a 1 m (Foto 3 da Prancha 1). Considera-se que o corpo vulcânico tem forma tabular de configuração subhorizontal, intercalado nas camadas areníticas da Formação Rio Doce. Sua textura é maciça, de cor cinza-clara e homogênea, apresentando grãos fragmentados de quartzo. Sendo diferente do SMT01, não se observa a feição de fraturas preenchidas por calcedônia de tamanho visível a vista desarmada.

O terceiro afloramento, SMT-03, está exposto na beira norte do Rio São Mateus, próximo a uma escarpa de falha da Formação Rio Doce, também na Fazenda Bela Vista, e é similar aos afloramentos SMT-01 e SMT-02, mostrando corpos tabulares subhorizontais muito alterados (Foto 4 da Prancha 1, curva tracejada indicada pela seta). Em sua borda emersa, foi encontrada a rocha piroclástica, interpretada como de um bloco rolado pouco alterado, possivelmente oriundo da escarpa, ou a parte saliente do corpo riolítico que está presente logo abaixo desse nível.



**PRANCHA 1. Foto 1:** Vista geral do afloramento SMT01 – (1) Rocha piroclástica riolítica; (2) Arenito grosso da Formação Rio Doce. **Foto 2:** Fraturas irregulares preenchidas por calcedônia, observadas no afloramento SMT01. **Foto 3:** Vista geral do afloramento SMT02. **Foto 4:** Vista geral do afloramento SMT03. A linha tracejada apontada pela seta corresponde ao topo do corpo piroclástico. **Foto 5:** Afloramento SMT04, na Fazenda Taquaraçu, intemperizado, do contato de um dique riolítico (à esquerda) intrusivo no arenito de Formação Rio Doce (à direita).

## OBSERVAÇÕES MICROSCÓPICAS

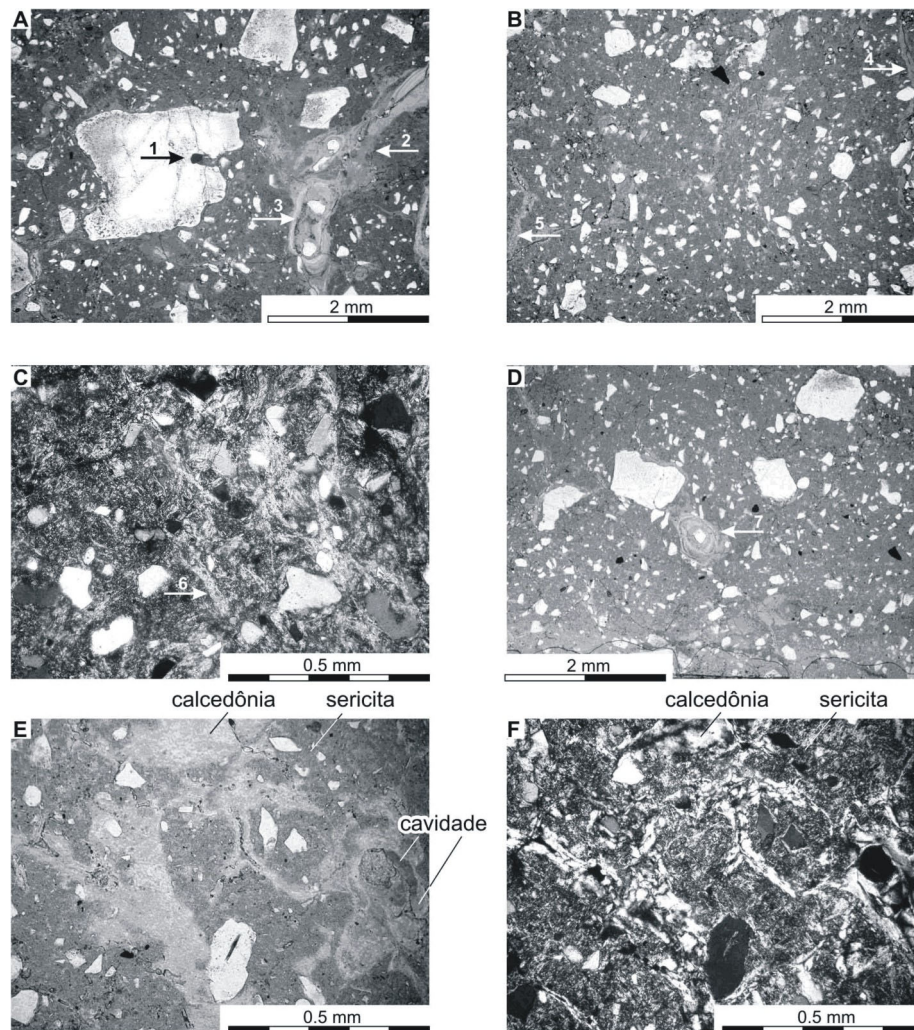
Foi realizada a observação preliminar da lâmina delgada da amostra coletada na proximidade do SMT03. A imagem microscópica em nicóis paralelos mostra textura porfirítica *lato sensu*, com presença de abundantes grãos de quartzo. A quantidade modal medida pela análise de imagem digital (Motoki et al., 2007a) é em torno de 15 %. O tamanho dos grãos é muito variável, desde micrométrico até milimétrico (Prancha 2, Fotomicrografias A, B, D, F). Além do quartzo, ocorrem poucos grãos de minerais opacos de tamanho inferior a 200 micrômetros. Encontra-se, mas raramente, a biotita como inclusão dentro do quartzo.

Certos grãos grandes de quartzo são idiomórficos, apresentando hábito bipiramidal, correspondente à fase alfa ( $\alpha$ -quartz). Alguns grãos mostram a textura de refusão (*resorption*, Prancha 2, Fotomicrografia A,

seta 1). Esta forma indica a cristalização a partir do magma de alta temperatura, indicando que os grãos de quartzo são fenocristais de rocha vulcânica de composição riolítica.

Existem certos grãos com forma parcialmente idiomórfica e parcialmente fragmentada. A maioria dos grãos é de tamanho pequeno e de forma fragmentada (Prancha 2, Fotomicrografias B, D). Isto é comumente encontrado em rochas piroclásticas félsicas. Não há indícios de seleção granulométrica, orientação ou acamamento. Esta observação sugere a ocorrência de atividade vulcânica que pulverizou os grãos idiomórficos de quartzo, tal como erupção explosiva.

A matriz é caracterizada por intensa sericitização e silicificação. A sericita tem hábito reticular e possui granulometria relativamente grande, tendo comprimento



**PRANCHA 2.** Aspectos microscópicos da amostra coletada do SMT03: (A) Fenocristal de quartzo da fase alfa, idiomórfico, com textura de refusão. Nicóis paralelos. (B) Grãos fragmentados de quartzo de tamanho variável. Nicóis paralelos. (C) Sericita de hábito reticular. Nicóis cruzados. (D) Concentrações elipsóidais de calcedônia. Nicóis paralelos. (E) Texturas em detalhe de calcedônia e sericita. Nicóis paralelos. (F) A mesma parte da lâmina sob nicóis cruzados.

de 100 micrômetros (Prancha 2, Fotomicrografia C, seta 6). Em nicóis paralelos, as áreas com concentrações de sericita apresentam cor bege escura (Prancha 2, Fotomicrografias A, B, D). Esta feição indica forte efeito da devitrificação da matriz composta de fragmentos finos de vidro vulcânico (*glass shard*), que ocorreu sob condição hidrotermal. A textura ígnea original da matriz não está preservada devido ao alto grau da alteração hidrotermal (Prancha 2, Fotomicrografias D, F).

## MODO DE OCORRÊNCIA GEOLÓGICA

Anteriormente supôs-se que a rocha em discussão poderia corresponder ao paleossolo originado da Formação Rio Doce. Foi encontrado na beira sul do Rio do Norte, a montante do afloramento SMT-01, o paleossolo de espessura aproximada de 2 m, que contém grãos de minerais de tamanho superior a 5 mm, compostos de quartzo, feldspato alcalino e muscovita. Esses minerais são muito diferentes dos grãos presentes na rocha vulcânica em estudo, compostos de quartzo fragmentado. Além disso, a sericitização e a silicificação muito intensas indicam temperatura hidrotermal incompatíveis com a sedimentação ou intemperismo a temperatura ambiente.

Paleossolo foi observado também abaixo da formação vulcânica de Cabiúnas (Eocretáceo) nos poços terrestres da PETROBRAS (1-LBM-1-ES e 1-FSL-1-ES). Os materiais são originados da Formação Mariricu, Membro Mucuri, da idade aptiana (Conceição et al., 1994).

Uma rocha vulcânica pode apresentar várias formas de ocorrência geológica: derrame de lava subaérea, depósito piroclástico subaéreo, lava subaquática, depósito piroclástico subaquático, conduto vulcânico (*volcanic vent*), fissura vulcânica (*fissure vent*), e corpos intrusivos variados (Motoki & Sichel, 2006).

O melhor critério para definição de forma de ocorrência geológica é dado pelos afloramentos de contato (Motoki & Sichel, 2006), porém esses não estão expostos na região estudada. Assim, deve-se recorrer aos critérios auxiliares: a rocha é originada diretamente de resfriamento do magma ou é composta de materiais piroclásticos; a forma do corpo é tabular, linear ou cilíndrico; a configuração do corpo é horizontal ou vertical; características observadas em lâmina delgada; etc.

A forma fragmentada de quartzo, confirmada nas observações de lâmina delgada, indica a origem piroclástica desta rocha. Portanto, os modelos de derrames de lava e corpos intrusivos são descartados. Rochas piroclásticas têm três formas principais de

Ao longo das fraturas, observa-se precipitação de calcedônia (Prancha 2, Fotomicrografias A, B, setas 3, 4, 5), que apresenta cor bege clara sob nicóis paralelos. A calcedônia forma eventualmente concentrações elipsoidais de 200 micrômetros a 2 mm (Prancha 2, Fotomicrografias A, D, setas 3, 7). No afloramento SMT01, esta textura é bem desenvolvida, sendo visível a vista desarmada (Prancha 1, Foto 2). A silicificação por calcedônia atinge a rocha inteira, resultando razoável grau de consolidação.

posicionamento: depósitos formados por meio de queda vertical dos materiais, chamados vulcanologicamente de *fall*, tais como cinza, escória e bomba; depósitos formados por movimento horizontal de materiais piroclásticos em alta velocidade, denominados *flow*, que resulta o fluxo piroclástico; materiais de preenchimento de condutos ou fissura subvulcânicas. Os condutos e fissuras vulcânicas têm grande extensão vertical, sendo quase infinitos, porém sua distribuição horizontal é limitada. Assim, a forma tabular de configuração subhorizontal dos corpos observada no campo é incompatível com os modelos de condutos e fissuras.

Depósitos vulcânicos de *fall* são distribuídos em uma grande área e pequena espessura. Sua extensão horizontal pode chegar a milhares de quilômetros. Portanto, a distribuição relativamente limitada da rocha interessada é desfavorável para o modelo de *fall*.

Sendo assim, resta o fluxo piroclástico como modelo viável.

Fluxos piroclásticos têm dois ambientes de deposição: subaéreo e subaquático. A intercalação desta rocha em camadas areníticas da Formação Rio Doce sugere deposição subaquática. A rocha não contém fragmentos líticos, tendo apenas grãos de quartzo de origem magmática. O fato indica que os três afloramentos observados não estão situados na proximidade da fonte eruptiva.

A sericitização é observada comumente em rochas piroclásticas constituintes de condutos e fissuras subvulcânicas, tal como no Sumiyoshigawa Acidic Rock Body, Japão (Motoki, 1979). Ocorre também nas faixas de hidrotermalismo de depósitos de fluxos piroclásticos soldados de composição riolítica, tal como na Mina de Mitsuishi, província de Okayama (Hongu et al., 2000) e na Mina de Shôkôzan, província de Hiroshima (Hida et al., 1996), ambas do Japão, onde ocorrem jazidas de sericita, pirofilita e talco. A sericitização dessas jazidas ocorreu junto com a recristalização dos fragmentos finos de vidro vulcânico que constituem da matriz, denominados *glass shards*.

A rocha em discussão apresenta, também, intensa

silicificação (Prancha 1, Foto 2; Prancha 2). Para que ocorra tal grau de silicificação, é necessário um ambiente hidrotermal de temperatura relativamente baixa, com grande abundância de água. Quando ocorreu a deposição subaquática dos materiais piroclásticos no fundo do lago, os materiais vulcânicos poderiam estar ainda em alta temperatura. Este calor e a água lacustre teriam formado um ambiente hidro-

termal dentro do depósito piroclástico subaquático durante o resfriamento do corpo vulcânico, causando devitrificação da matriz por meio de sericitização.

Os três afloramentos observados, embora afastados por distâncias de quilômetros, possuem os mesmos aspectos litológicos. O fato sugere os corpos vulcânicos formados por eventos eruptivos similares.

## PROCESSO DE ERUPÇÃO VULCÂNICA

As rochas piroclásticas ocorrem apenas em três afloramentos isolados e as descrições petrográficas são limitadas; portanto, não é possível apresentar um modelo detalhado do processo de erupção vulcânica com abundantes comprovações de fundamentos geológicos. Mesmo assim, as observações geológicas e petrográficas acima citadas, junto com os conhecimentos vulcanológicos estabelecidos em outras regiões do mundo, permitem sugerir um modelo simples, de caráter geral e conceitual, para o processo de formação dos depósitos de rochas piroclásticas riolíticas acima citadas.

No início do Paleogeno, quando do estágio inicial de sedimentação da Formação Rio Doce, ocorreu ascensão do magma riolítico na Bacia do Espírito Santo. Próximo à superfície, o magma em contato com ambientes lacustres ou sedimentos aquosos promoveu uma erupção explosiva, formando grãos pulverizados de quartzo e fragmentos finos de vidro vulcânico. A erupção foi de escala não muito grande.

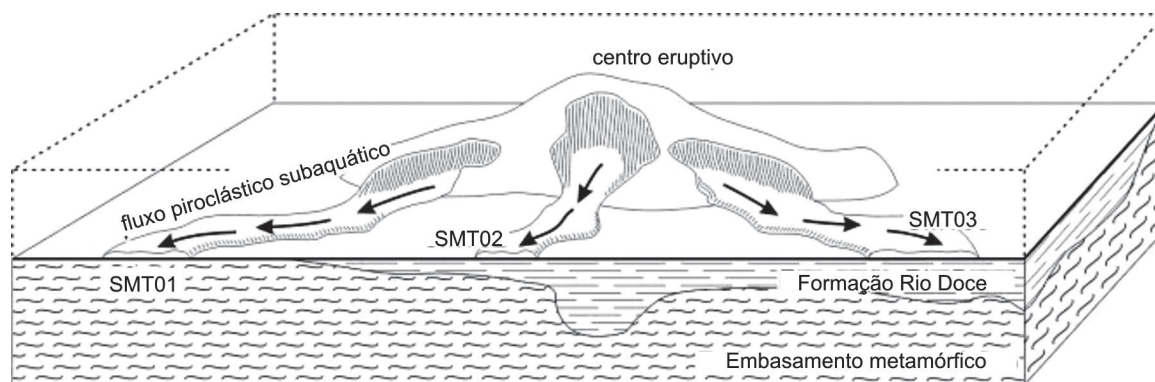
Os materiais piroclásticos foram acumulados em torno do centro eruptivo, formando o morro central subaquático. Durante a formação deste morro, os clastos grandes presentes nos materiais piroclásticos afundaram e as pedra-pomes flutuaram, graças à densidade de água muito maior do que a da atmosfera. Por meio dessa seleção, na superfície deste morro subaquático, foram expostos materiais piroclásticos

compostos de partículas finas.

Logo em seguida, os materiais constituintes da parte superficial do morro se espalharam formando fluxos de alta velocidade, denominados fluxos piroclásticos subaquáticos (*subaqueous pyroclastic flow*; e.g., Cas & Wright, 1991; Stix, 1991; Kokelaar & Busby, 1992). Os fragmentos de vidro vulcânico em contato com a água lacustre, ainda com temperatura elevada, geraram um ambiente hidrotermal, com grande abundância de água, dentro do depósito piroclástico. Nesta condição, ocorreram intensas sericitização e silicificação da matriz.

Em outras regiões do mundo, são conhecidos os depósitos de fluxos piroclásticos subaquáticos de alta temperatura e certos depósitos apresentam soldagem (e.g. Yamada, 1973; Sparks et al., 1980; Fritz & Stillman, 1996). A temperatura necessária para a sericitização e silicificação dos depósitos vulcânicos em discussão não é tão alta; portanto, considera-se que a formação temporária do ambiente hidrotermal dentro do depósito vulcânico subaquático é um modelo viável.

Após o resfriamento total, os depósitos vulcânicos foram soterrados pelos sedimentos da Formação Rio Doce e da Formação Barreiras. A erosão recente do Rio São Mateus expôs uma parte do corpo piroclástico (Figura 2). Conforme o modelo eruptivo proposto, poderia existir um pequeno edifício vulcânico



**FIGURA 2.** Ilustração esquemática do modelo para o posicionamento geológico do depósito piroclástico riolítico.

composto de materiais piroclásticos oculto na Formação Rio Doce.

Não foram encontrados ainda as evidências geológicas que comprovam a ocorrência do morro central e fluxos piroclásticos subaquáticos. Entretanto,

dentro dos possíveis modelos eruptivos, essa idéia é mais coerente com o modo de ocorrência geológica e características petrográfica das rochas piroclásticas félsicas em discussão. Para que o modelo citado possa ser consolidado, são necessárias evidências geológicas adicionais.

## POSSIBILIDADE DE DIQUES PIROCLÁSTICOS

A forma tridimensional dos corpos piroclásticos é um importante argumento para justificar o modelo de erupção subaquática. Entretanto, essa foi admitida com base na distribuição das rochas em torno dos afloramentos e não foi confirmada por observações de afloramentos de contato. Sendo assim, a possibilidade de diques piroclásticos ainda não foi totalmente descartada. Os diques de rochas piroclásticas de outras regiões, tal como de Nova Iguaçu (RJ), apresentam forma irregular com pequena continuidade horizontal. Esses contêm clastos grandes, de 5 a 30 cm, compostos de rocha encaixante (Motoki et al., 2007b). Entretanto, as rochas piroclásticas têm apenas fragmentos de quartzo, e não clastos nem grãos minerais oriundos de arenitos da Formação Rio Doce. Por isso, é pouco provável serem diques piroclásticos.

Por outro lado, poderiam ocorrer verdadeiros diques piroclásticos de intrusão contemporânea. Na Fazenda Taquaraçu, SMT04, encontra-se um afloramento extremamente intemperizado de um corpo sugestivo de dique riolítico intrusivo no arenito grosso

da Formação Rio Doce (Prancha 1, Foto 5).

A difratometria de raios X desta amostra apresentou em sua composição mineralógica atual 50% de argila, 30% de quartzo, 15% de feldspato e 5% de dolomita (Silva et al., 2006). A análise da fração muito fina, inferior a 2 micrómetros, mostrou alto teor relativo de caulinita: 80% de caulinita, 15% de illita e 5% dos materiais de baixo grau de cristalização. A abundância de caulinita pode estar relacionada ao intemperismo muito intenso desta região. A precipitação do carbonato sugere alteração hidrotermal, que ocorre comumente em condutos e fissuras subvulcânicos, tais como de Poços de Caldas (MG) (Motoki 1988) e Nova Iguaçu (RJ) (Motoki et al., 2007b).

Um tema interessante sobre o magmatismo da Bacia Sedimentar do Espírito Santo é a origem do magma riolítico. Não se sabe ainda se o magma félsico foi produto de cristalização fracionada do magma basáltico da região marítima, tal como do arquipélago de Abrolhos, ou de fusão parcial da crosta continental pelo calor do magma máfico.

## MAGMATISMO E TECTONISMO REGIONAL

Na literatura encontram-se duas idéias distintas sobre a relação entre o tectonismo regional e ocorrência de corpos intrusivos tabulares. A idéia tradicional explica que a intrusão ocorre ao longo das zonas de fraturas que estão presentes na crosta superior de comportamento rúptil. A direção preferencial dos diques poderia representar as falhas fósseis. Esta idéia é amplamente aceita no Brasil. Vários autores (e.g., Almeida, 1986; Ricommini et al., 2004) interpretaram que os diques fanerozóicos intrudem ao longo das linhas de fraqueza presentes no embasamento pré-cambriano, tais como zonas de cisalhamento e falhas.

Por outro lado, a idéia moderna, que foi originada de pesquisas tecnológicas de extração de petróleo (e.g. Hubbert & Willis, 1957), explica que o magma cria uma nova fratura para sua intrusão em direção perpendicular ao esforço principal mínimo, chamado de  $\sigma_3$ , conforme o princípio de fraturamento hidráulico (*hydraulic fracturing*; e.g., Hubbert & Willis, 1957; Haimson, 1975). A direção preferencial dos diques é definida conforme o esforço local, independentemente

da existência, ou não, de zonas de fraqueza na rocha encaixante. Desta forma, os diques foram utilizados como bons indicadores da condição do esforço tectônico durante o tempo geológico (Nakamura, 1977; Ui et al., 1984; Motoki & Ávila, 1988; Motoki et al., 1988; Ricommini, 1997; Ricommini et al., 2004). Este método é útil também para a interpretação tectônica das orientações dos corpos intrusivos desta região, tal como o dique Vitória, do Eocretáceo (Novais et al., 2003; 2006).

O evento vulcânico foi preferencialmente de caráter subaquático que ocorreram dentro da bacia sedimentar. Este fato sugere que a geração do magma está intimamente relacionada ao tectonismo distensivo da abertura do Oceano Atlântico e conseqüente formação das bacias sedimentares na margem continental. Há duas opiniões sobre o processo de formação das bacias sedimentares e de intrusão magmática.

Os magmatismos que ocorrem em bacias sedimentares eventualmente têm importante participação na formação de jazidas petrolíferas. Certos campos da Patagônia (Argentina), tais como Pata Mora e Auca



Mahuida, as jazidas estão situadas abaixo de lavas basálticas, sugerindo possível contribuição do calor magmático para amadurecimento dos folhelhos geradores. Os *sills* presentes na Bacia Sedimentar de Solimões também são interpretados como o agente que amadureceu o folhelho ordoviciano (Aires, 1984; Wanderley Filho et al., 2005). O magmatismo riolítico acima citado corresponde a uma nova fonte do calor e nesse sentido pode ter importância para as jazidas do petróleo do Espírito Santo.

As fraturas presentes no embasamento meta-

mórfico e formações sedimentares também são importantes. Essas são frutos de múltiplos movimentos de tectonismos rúpteis da região de São Mateus. Sendo diferente da intrusão magmática que acompanha expansão volumétrica do corpo intrusivo, as fraturas comportam como condutos para circulação de fluidos superficiais e hidrotermais profundos, inclusive hidrocarbonetos. Dessa forma, é necessário esclarecer a relação entre a direção preferencial dos diques e dos sistemas de fraturas e falhas, especialmente com base no modelo de fraturamento hidráulico.

## CONCLUSÕES

Os trabalhos de campo e as observações microscópicas confirmam a ocorrência da rocha riolítica na porção norte da Bacia do Espírito Santo, que forma corpos piroclásticos de erupção subaquática. A erupção foi explosiva de pequena escala e, ocorreu no Paleogeno, no estágio inicial da sedimentação da Formação Rio Doce. A reação entre o *glass shard* da matriz do depósito piroclástico e a água lacustre causou intenso hidrotermalismo promovendo sericitização e silicificação.

É inédita a citação da ocorrência de rochas vulcâ-

nicas, com características de erupção subaquática, de idade cenozóica, na porção continental do norte da Bacia do Espírito Santo. Datações dessas rochas vulcânicas, combinados com análises de esforços tectônicos durante os eventos eruptivos e intrusivos, podem oferecer um modelo mais avançado de evolução tectono-sedimentar desta bacia, bem como das características geodinâmicas durante a ruptura do Continente Gondwana Ocidental na margem atual do continente sul-americano, que formaram as bacias sedimentares com campos petrolíferos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Petróleo Brasileiro (PETROBRAS), representada pelos Gerentes do Ativo de Produção Norte Capixaba, Deodoro, Venturini e José Reinaldo, pelo apoio integral e logística, à Dra. Daisy Alves, aos Engenheiros Peluzzo, Marcelo Lopes de Oliveira (em memória) e ao Técnico de Geologia José Roberto, pelas contribuições técnicas. Estão gratos também aos geólogos Rodrigo Soares e Giannis Hans Petrakis pelas discussões científicas e tratamento de imagens microscópicas pelo *software* Wilbur 1.0A.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AIRES, J.R. Estudo do vulcanismo básico da Bacia do Amazonas. Rio de Janeiro: Divisão de Exploração (DIVEX), Centro de Pesquisa da PETROBRAS (CENPES), PETROBRAS. **Relatório Interno**, 64 p., 1984. (Inédito).
2. ALMEIDA, F.F.M. DE. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, p. 325-349, 1986.
3. ASMUS, H.F.; GOMES, J.B.; PEREIRA, A.C.B. Integração geológica regional da Bacia do Espírito Santo. **Relatório Interno**, PETROBRAS, 1971. (Inédito).
4. CAS, R.A.F. & WRIGHT, J.V. Subaqueous pyroclastic flows and ignimbrites: an assessment. **Bulletin of Volcanology**, v. 53, p. 357-380, 1991.
5. CONCEIÇÃO, J.C.J.; MISUZAKI, A.M.P.; ALVES, D.B.; SZATIMARI, P. Controle tectônico do magmatismo meso-oceânico no sul e sudeste do Brasil e seu papel na evolução das bacias sedimentares. Fase I : Bacias do Espírito Santo, Mucuri e Cumuruxatiba. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisa de PETROBRAS (CENPES), Superintendência de Exploração (SUPEP), Divisão de Exploração (DIVEX), Setor de Tecnologia (SETEC), **Relatório Interno**, Petrobrás, 1994. (Inédito).
6. CUNHA, F.M.B. Influência das linhas estruturais do pré-cambriano no arcabouço das bacias costeiras do leste brasileiro entre os Estados de Alagoas e Espírito Santo. In: SEMINÁRIO DE TECTÔNICA (Tectos-1), 1, 1987, Rio de Janeiro. **Atas...** Rio de Janeiro: Departamento de Exploração (DEPEX), Centro de Pesquisa de PETROBRAS (CENPES), PETROBRAS, 1987, p. 459-487. (Inédito).
7. FRITZ, J.W. & STILLMAN, C.J. A subaqueous welded tuff from the Ordovician of County Waterford, Ireland. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 70, p. 91-106, 1996.
8. HAIMSON, B.C. Deep in-situ stress measurements by hydrofracturing. **Tectonophysics**, v. 29, p. 41-47, 1975.
9. HEILBRON, M.; MOHRIAK, W.; VALERIANO, C.M.; MILANI, E.; ALMEIDA, J.C.H.; TUPINAMBÁ, M. From collision to extension, the rocks of the southeastern continental

- margin of Brazil. In: MOHRICK, W.U. & TALWANI, M. (Eds.), **Atlantic rifts and continental margins**. Washington, American Geophysical Union, Ser. 115, p. 1-32, 2000.
10. HIDA, T.; ISHIYAMA, D.; MIZUTA, T.; ISHIKAWA, Y. Geologic characteristics and formation environments of the Yano-Shokozan pyrophyllite deposit, Hiroshima Prefecture, Japan - Volcanic successions and hydrothermal alterations processes. Hiroshima: Nendo Kagaku, **Journal of the Clay Science Society of Japan**, v. 36, n. 2, p. 62-72, 1996.
  11. HONGU, H.; KITAGAWA, R.; NISHIDO, H. Modes of occurrence and K-Ar ages of "roseki" deposits in Mitsuishi Deistrict, Okayama Prefecture. Hiroshima: Nendo Kagaku, **Journal of the Clay Science Society of Japan**, v. 40, n. 1, p. 46-53, 2000.
  12. HUBBERT, M.K. & WILLIS, D.G. Mechanics of hydraulic fracturing. **Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers**, v. 210, p. 153-164, 1957.
  13. KOKELAAR, P. & BUSBY, C. Subaqueous explosive eruption and welding of pyroclastic deposits. **Science**, v. 257, p. 196-201, 1992.
  14. MILANI, E.J.; BRANDÃO, J.A S L.; ZALÁN, P.V.; GAMBOA, L.A.P. Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 18, n. 3, 2000.
  15. MIRANDA, E.E. & COUTINHO, A.C. **Brasil Visto do Espaço**. Campinas: Embrapa, Monitoramento por Satélite, 2004. Disponível em: <http://www.cdbrasil.cnpem.br>. Acesso em 10set2006.
  16. MOTOKI, A. Cretaceous volcanic vents in southeast part of Mt. Rokko, western Honshu, Japan. Tokyo: **Bulletin of the Volcanological Society of Japan**, v. 24, n. 2, p. 55-72, 1979. (Em japonês).
  17. MOTOKI, A. An outline about problems of volcanic caldera hypothesis of the Poços de Caldas Alkaline Complex rock body, Minas Gerais - São Paulo, Brazil. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE GEOLOGIA, 7, 1988, Belém. **Anais...** Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988, v. 1, p. 309-323.
  18. MOTOKI, A. & ÁVILA, C.A. Dyke-sill transitions of alkaline tabular rock bodies at Arraial do Cabo, Rio de Janeiro, Brazil. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE GEOLOGIA, 7, 1988, Belém. **Anais...** Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988, v. 1, p. 294-308.
  19. MOTOKI, A. & SICHEL, S.E. Avaliação de aspectos texturais e estruturais de corpos vulcânicos e subvulcânicos e sua relação com o ambiente de cristalização, com base em exemplos do Brasil, Argentina e Chile. Ouro Preto: **Revista da Escola de Minas**, v. 59, n. 1, p. 13-23, 2006.
  20. MOTOKI, A.; ÁVILA, C.A.; ROIG, H.L. Estudos litológicos e geológicos dos corpos tabulares no município de Arraial do Cabo, RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém. **Anais...** Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988, v. 6, p. 2727-2739.
  21. MOTOKI, A.; PETRAKIS, G.H.; SOARES, R.; SICHEL, S.E.; AIRES, J.R. New method of semi-automatic modal analyses for phenocrysts of porphyritic rocks based on quantitative digital colour specification technique. Ouro Preto: **Revista da Escola de Minas**, v. 60, n. 1, p. 13-20, 2007. (a).
  22. MOTOKI, A.; SOARES, R.; LOBATO, M.; SICHEL, E.S.; AIRES, J.R. Feições intempéricas em rochas alcalinas félsicas de Nova Iguaçu, RJ. Ouro Preto: **Revista da Escola de Minas**, 60-1, 2007. (b). (No prelo).
  23. NAKAMURA, K. Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation. Principle and proposal. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 2, p. 1-16, 1977.
  24. NOVAIS, L.C.C.; NEVES, M.T.; COSTA, R.C.; LOWSBY, M.G.; SUGUIO, A.H.; OLIVEIRA, M.L.; ANJOS, K.M. Modelo estrutural dos campos petrolíferos com alto grau de exploração, na porção terrestre da Bacia do Espírito Santo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 43, 2006, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Sociedade Brasileira de Geologia, 2006, p. 12.
  25. NOVAIS, L.C.C.; TEIXEIRA, L.B.; NEVES, M.T.; RODARTE, J.B.M.; ALMEIDA, J.C.H.; VALERIANO, C.M. Novas ocorrências de diques de diabásio na faixa Colatina - ES: estruturas rúpteis associadas e implicações tectônicas para as bacias de Campos e do Espírito Santo. Rio de Janeiro: **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 12, n. 1, p. 191-194, 2003.
  26. RICOMMINI, C. Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 2, p. 153-162, 1997.
  27. RICOMMINI, C.; SANT'ANNA, L.G.; FERRARI, A.L. Evolução geológica do rift continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V., BARTORELLI, A., CARNEIRO, C.D.R., BRITO-NEVES, B.B. (Coords.). **Geologia do continente sul-americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Editora Beca, p. 385-405, 2004.
  28. SILVA, F.C.; MELLO, M.C.S.; PAZ, A.C. **Mineralogia total de uma amostra identificada como superfície 13**. PETROBRAS, Relatório Interno, 4 p., 2006. (Inédito).
  29. SILVA, J.M.R. Geologia. In: PROJETO RADAMBRASIL, **Levantamentos de Recursos Naturais - Folha SE 24 Rio Doce**. Rio de Janeiro, v. 34, 544 p., 1987.
  30. SPARKS, R.J.S.; SIGURDSSON, H.; CAREY, S. The entrance of pyroclastic flows into the sea, I. Oceanographic and geologic evidence from Dominica, Lesser Antilles. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 7, p. 87-96, 1980.
  31. STIX, J. Subaqueous, intermediate to silicic-composition explosive volcanism: a review. **Earth Science Review**, v. 31, p. 21-53, 1991.
  32. UI, T.; KONO, M.; HAMANO, Y.; MONGE, F.; AOTA, Y. Reconstruction of a volcanic edifice using the dike swarm at Ocos, Peruvian Andes. **Bulletin of the Volcanological Society of Japan**, v. 29-4, p. 285-296, 1984.
  33. VIEIRA, R.A.B. **Análise estratigráfica e evolução paleogeográfica da seção neoptiana na porção sul da Plataforma de São Mateus, Bacia do Espírito Santo, Brasil**. Porto Alegre, 158 p. 1998. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
  34. WANDERLEY FILHO, J.R.; TRAVASSOS, W.A.S.; ALVES, D.V. O diabásio nas bacias paleozóicas amazônicas - herói ou vilão? Rio de Janeiro: **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 14, n. 1, p. 177-184, 2005.
  35. YAMADA, E. Subaqueous pumice flow deposits in the Onikobe Caldera, Miyagi Prefecture, Japan. Tokyo: **Journal of the Geological Society of Japan**, v. 79, p. 585-599, 1973.

*Manuscrito Recebido em: 18 de agosto de 2007  
Revisado e Aceito em: 15 de outubro de 2007*