

OFÍCIO

Alegre, ES, 30 de outubro de 2025.

Assunto: Informações sobre os questionamentos contidos no Ofício n. 526/2025/MPF/PR/AL/GABPR12

Interessados: Procuradoras Julia Wanderley Vale Cadete, Roberta Lima Barbosa Bonfim e Juliana de Azevedo Santa Rosa Câmara.

C/C: À Defensoria Pública do Estado de Alagoas (DPE-AL), representada pelo Defensor Público Ricardo Antunes Melro.

Prezados,

Em atendimento ao Ofício n. 526/2025/MPF/PR/AL/GABPR12, segue:

1. sobre o Relatório técnico-científico apresentado, questiona-se o seguinte:

a) qual a metodologia aplicada?

A metodologia utilizada foi descrita nas seções 2 e 6 do relatório. Na seção 2 apresenta-se os dados disponibilizados pela DPE-AL e na seção 6 descreve-se como os mesmos foram analisados.

O relatório em sua plenitude foi elaborado a partir destes dados.

b) qual a forma de participação de cada um dos colaboradores no estudo, especificando a área de conhecimento e a análise que lhe coube no estudo?

A informação está indicada na capa e contracapa do relatório.

- **Marcos Eduardo Hartwig: conceitualização, metodologia, análise formal, investigação, redação, edição, visualização e supervisão. Área do conhecimento: especialista em InSAR e Geologia de Engenharia.**
- **Magdalena Vassileva: conceitualização, metodologia, análise formal, investigação, redação, edição e supervisão. Área do conhecimento: especialista em geodésia e análise de riscos geológicos utilizando InSAR.**
- **Fábio Furlan Gama: redação, revisão e edição. Área do conhecimento: especialista em sensoriamento remoto radar aplicado ao monitoramento de áreas de mineração.**

- **Djamil Al-Halbouni: redação, revisão e edição. Área do conhecimento: especialista em processos de subsidência utilizando sensoriamento remoto, geofísica e modelagem numérica.**
- **Mahdi Motagh: redação, revisão e edição. Área do conhecimento: especialista em geodésia e análise de riscos geológicos utilizando sensoriamento remoto.**

É importante salientar que o trabalho foi desenvolvido em equipe, com todos os pesquisadores revisando e validando o seu conteúdo.

c) como ocorreu a participação dos pesquisadores residentes no exterior?

Ocorreram reuniões virtuais via GoogleMeets, troca de e-mails e mensagens via Whatsapp, além do compartilhamento de arquivos para edição. Cabe destacar que a DPE-AL participou de algumas das reuniões virtuais.

d) considerando que há menção à participação de profissionais de outras nacionalidades, como ocorreu a tradução para o português da versão apresentada?

O documento foi redigido em português pelo autor Marcos e com o auxílio da autora Magdalena e, posteriormente, traduzido pelo autor Marcos para o inglês e disponibilizado para todos. Finalmente, foi feita uma reunião virtual na qual discutiu-se o conteúdo do relatório.

Posteriormente, elaborou-se a versão final do relatório, que foi então vertida e adaptada para o inglês na forma de artigo científico, visando sua divulgação em periódicos especializados.

Importante ressaltar que dois dos pesquisadores internacionais (Magdalena e Djamil) compreendem os idiomas português e inglês facilitando também o acesso e a compreensão de todos os documentos técnicos disponibilizados. Além disso, os autores Magdalena, Mahdi e Djamil têm várias colaborações científicas e também uma publicação sobre o afundamento em Maceió, publicada em abril de 2021.

e) considerando que há menção à participação de profissionais de outras nacionalidades, a versão apresentada em português foi traduzida oficialmente para subscrição dos profissionais estrangeiros?

O estudo foi elaborado originalmente em português, com pleno entendimento entre todos os participantes, conforme descrito no item anterior.

Não foi realizada a tradução oficial (juramentada) do relatório.

f) como e quando ocorreu a visita em campo da equipe de profissional subscritores?

O intuito do relatório foi subsidiar a Defensoria Pública de Alagoas (DPE-AL) a partir dos dados disponibilizados.

O pesquisador Marcos esteve no local em agosto de 2025 visitando algumas áreas selecionadas a pedido da DPE-AL. Na visita, que teve duração de aproximadamente cinco horas, foi feito o registro fotográfico de algumas feições e diálogo com os moradores.

Os autores Magdalena e Mahdi visitaram Maceió em dezembro de 2022 e o autor Mahdi fez uma segunda visita em dezembro 2023. Os autores foram à Maceió a convite da Defesa Civil de Maceió.

g) para confecção do relatório os dados de DGPS foram disponibilizados e acessados?

Foram disponibilizados e acessados um total de nove (9) planilhas Excel (Microsoft) de dados DGNSS.

h) houve análise conjunta e integrada dos dados de interferometria, dos dados de DGPS e dos dados de monitoramento colhidos pela equipe de profissionais em campo?

Os dados de deslocamento horizontal Leste-Oeste (E-W) e vertical de interferometria foram confrontados com os dados geológicos e de campo disponíveis.

Os dados de deslocamento DGNSS não foram processados, pois, as informações contidas nos arquivos Excel (Microsoft) não estavam claras aos pesquisadores. Além disso, não foram encontradas informações sobre as coordenadas das antenas DGNSS.

No intuito de poder avaliar minimamente a distribuição e a magnitude das componentes horizontais do vetor deslocamento, os autores fizeram uso dos dados apresentados no relatório interno Geoapp, datado de fevereiro de 2025 (RELATÓRIO MENSAL SOBRE DADOS DE MONITORAMENTO NA REGIÃO DE MACEIÓ).

i) como ocorreu a avaliação do dano nos imóveis?

Os danos compreendem principalmente fissuras, trincas, rachaduras, fendas e brechas.

Alguns imóveis na região afetada pela subsidência foram inspecionados pela DPE-AL. Os dados coletados incluem o endereço dos imóveis, fotografias/vídeos dos danos, localização dos danos no imóvel, escala dos danos (estimativa da abertura e extensão), inclinação dos danos e entrevistas com os moradores. Estas informações foram repassadas aos autores do relatório, que as utilizaram tendo como base as informações contidas na Tabela 8 do relatório.

O ideal seria coletar dados de todos os imóveis com base em métodos padronizados (e.g., IBAPE, ABNT etc.), seguido de análise específica e

conjuntural. Tal abordagem, contudo, demandaria investimento financeiro, além de mais tempo e equipe técnica.

j) as peculiaridades do solo dos territórios foram consideradas nas avaliações dos danos?

Os aspectos geológico-geotécnicos do subsolo da área afetada estão descritos em algumas publicações técnico-científicas e em relatórios internos. As publicações que tivemos acesso foram consultadas e integradas e estão citadas na seção 5 do relatório. A Figura 1 mostra uma síntese das características geológicas da área.

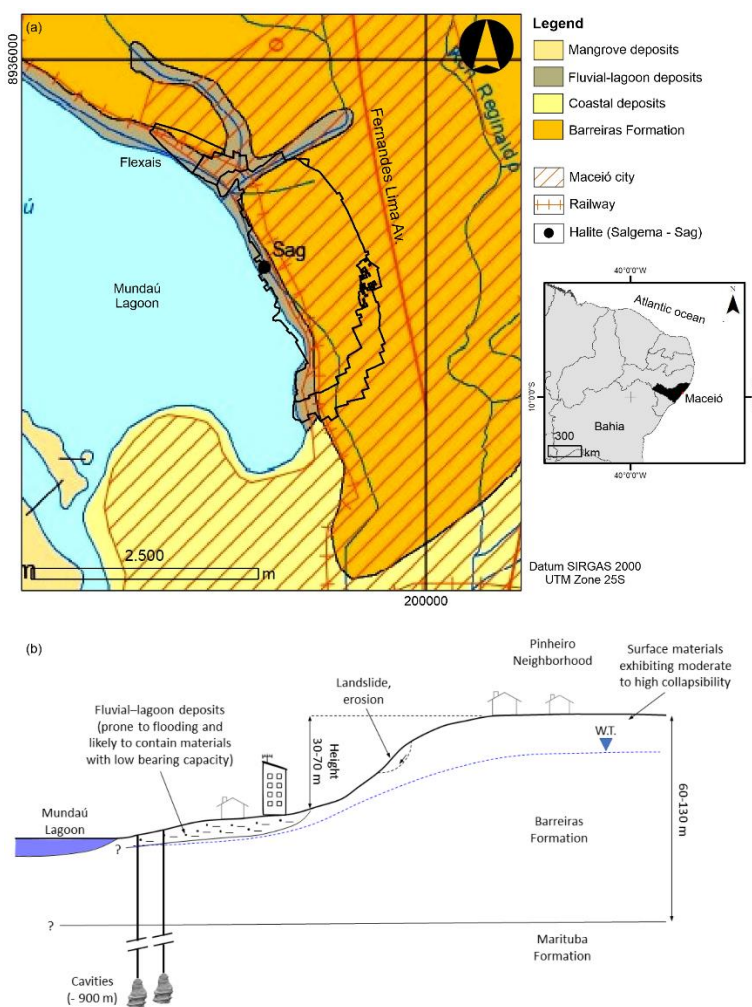


Figura 1 – a) mapa geológico; e b) seção geológico-geotécnica esquemática. Fonte: Santos e Coutinho (2022), Santos et al. (2022); RJQDOSSANTOS (2023) e Alcantara et al. (2023).

k) o estudo de geologia coube a que profissional da equipe multidisciplinar?

A compilação e análise dos dados geológico-geotécnicos disponíveis na literatura foi realizada pelo pesquisador Marcos e comentada pelo pesquisador Djamil.

2) acerca da recomendação contida na alínea "a" do Relatório, no sentido de que se promova a revisão/atualização do Mapa de Linhas de Ações Prioritárias, o que exatamente se propõe?

A bacia de recalques (Figura 7) afeta uma área maior que aquela delimitada no Mapa de Linhas de Ações Prioritárias (Versão 5). Embora as velocidades de deslocamento vertical na periferia deste mapa sejam consideradas diminutas (< -5 mm/ano), elas continuam ativas em muitas áreas e os deslocamentos são acumulativos no tempo. Dessa forma, estes deslocamentos acumulados podem gerar danos aos imóveis, particularmente, os mais simples e construídos sobre material de baixa capacidade de suporte (i.e. solo mole, aterro lançado etc.). Existem residências na periferia do mapa nestas condições que apresentam danos. Portanto, recomenda-se que estas áreas também sejam incluídas no referido mapa.

Existe atualmente área que necessita ser evacuada e que não está contemplada no Mapa de Linhas de Ações Prioritárias elaborado pela Defesa Civil de Maceió? Qual a área? Caso positivo, quais os critérios técnicos que fundamentam esta recomendação?

A comunidade dos Flexais (bairro Bebedouro) é uma área naturalmente vulnerável a alguns processos geológicos (Figura 5). A parte baixa está sujeita a alagamentos, pois é uma área plana, construída sobre solo mole (depósitos flúvio-lagunares), e próxima ao nível do espelho d'água da Lagoa Mundaú. A parte alta, adjacente, é uma região declivosa, sustentada pelos depósitos semi-consolidados da Formação Barreiras, sujeita a processos erosivos e a movimentos de massa gravitacional.

Este território registra deslocamentos verticais e, principalmente, horizontais (Figura 8). Esta área não foi incluída no Mapa de Linhas de Ações Prioritárias.

Assim, o movimento decorrente da convergência das minas de dissolução de sal intensifica a vulnerabilidade desta área. Além disso, edifícios com padrão mais simples são mais sensíveis a movimentos do solo e podem sofrer danos significativos, mesmo com pequenas movimentações, como apontado no relatório.

Portanto, recomenda-se que a área dos Flexais seja incluída na Zona 00 do Mapa de Linhas de Ações Prioritárias.

3) acerca da recomendação contida na alínea "b" no sentido de atualização do mapa de feições de instabilidade (rupturas no solo e na infraestrutura), a justificativa técnica apresentada pela Defesa Civil Municipal para não inclusão da referida feição foi avaliada pelos autores do relatório?

Os autores não têm conhecimento desta justificativa. A imensa maioria das feições de instabilidade mapeadas pela CPRM e atualizadas pela DCM foi incluída no Mapa de Linhas de Ações Prioritárias, com exceção das feições apontadas na Figura 7 do relatório.

A significância das feições de instabilidade foi discutida na subseção 7.1 do relatório.

4) acerca da recomendação contida na alínea "c" de monitoramento contínuo dos deslocamentos de superfície por meio da tecnologia MT-InSAR, no entendimento dos professores, a Defesa Civil Municipal realiza o monitoramento contínuo ou há algo na rotina do órgão que precisa ser aperfeiçoado?

Recomenda-se que o monitoramento dos deslocamentos obtidos por meio das tecnologias MT-InSAR e DGNSS seja mantido até que a estabilização dos movimentos seja comprovada.

Nas áreas já demolidas, recomenda-se a instalação de refletores de canto (*corner reflectors*) para assegurar a continuidade dos pontos de medição MT-InSAR.

Além disso, a fim de ampliar o número de pontos de medição e permitir a detecção de deslocamentos diferenciais em escala compatível com a dos edifícios, recomenda-se utilizar a resolução máxima disponível das imagens de radar. Atualmente, os dados de deslocamento vertical e horizontal Leste-Oeste, obtidos por meio da abordagem MT-InSAR, estão reamostrados para 10 m.

quais os instrumentos em acréscimo que poderiam ser utilizados para fortalecer o monitoramento? Em caso positivo, indicar a justificativa técnica e localidade que poderiam/precisariam ser instalados.

Os instrumentos MT-InSAR e DGNSS permitem medir as componentes Leste-Oeste (E-W), Norte-Sul (N-S) e vertical do vetor deslocamento. Contudo, a malha de monitoramento destes instrumentos não permite capturar com detalhe suficiente os movimentos que ocorrem a nível de edificação. Portanto, recomenda-se que sejam instalados fissurômetros nos imóveis que apresentam danos. Estes instrumentos são relativamente baratos e de fácil manuseio e devem ser instalados tanto nos imóveis localizados na Zona 01 (sob monitoramento), como nos imóveis localizados na periferia do Mapa de Linhas de Ações Prioritárias. Estes instrumentos permitiriam monitorar a evolução dos danos.

5) acerca da recomendação contida na alínea "d" de adensamento na cobertura de dados DGNSS nas bordas do mapa de ações prioritárias para o monitoramento da componente horizontal de deslocamento, há algum local em que os autores entendem que não há adequada cobertura de DGNSS? Caso positivo, indicar a justificativa técnica, a quantidade e a localidade que poderiam/precisariam ser instalados.

Segundo a Figura 11 do relatório Geoapp (2015), em janeiro de 2025 existiam um total de 89 antenas GNSS na área afetada pelo processo de subsidência. A Figura 2 mostra a disposição das mesmas.

As regiões dos bairros de Bom Parto e Bebedouro mostram deslocamentos horizontais consistentes na direção das cavidades subterrâneas. Esta componente do deslocamento, que possui direção Sul-Sudeste (SSE)/Norte-Noroeste (NNO), não é bem capturada pela interferometria, que detecta apenas a componente horizontal Leste-Oeste (E-W). Como estes territórios possuem poucas antenas, pois encontram-se na periferia da bacia de recalque, recomenda-se que sejam instaladas mais duas (2) antenas em cada uma destas áreas.



Figura 2 - Distribuição das antenas GNSS na área afetada pelo processo de subsidência. Fonte: Geoapp (2025).

6) acerca da recomendação contida na alínea "e" de acompanhamento sistemático dos danos em edificações com base em metodologias consagradas, incluindo a utilização de fissurômetros (foto 7 da Figura 33) para monitorar sua evolução, especialmente nos imóveis localizados na periferia do mapa de ações prioritárias, os professores tiveram acesso às notas técnicas referentes à atuação da Junta Técnica e do Comitê de Acompanhamento Técnico que seguem em anexo? Há algum ajuste na rotina adotada que precisa ser aperfeiçoado?

No e-mail datado de 17 de outubro de 2025, foi encaminhado, em formato PDF, apenas o Ofício nº 526/2025/MPF/PR/AL/GABPR12.

No e-mail datado de 21 de outubro de 2025, foi enviada, também em formato PDF, a seguinte relação de arquivos:

- a) Protocolo de Atuação da Junta Técnica;
- b) Protocolo de Atuação CAT – Atualizado 2023;
- c) Nota Técnica – Atualização do Mapa – Versão 4 – Dezembro/2020;
- d) Nota Técnica – Mapa – Versão 5 – Outubro/2023; e
- e) Nota Técnica – Atualização do Mapa – Versão 2 – Maio/2020.

Não tivemos acesso aos documentos indicados nos itens “a” e “b”.

Os documentos “c”, “d” e “e” apresentam registros fotográficos das inspeções de campo, a evolução dos deslocamentos e as modificações nas zonas de criticidade do Mapa de Setorização de Danos e de Linhas de Ações Prioritárias entre os anos de 2020 e 2023.

Considerando o documento “d” – o mais recente e vigente – seguem algumas recomendações:

- 1) Além da velocidade de deslocamento vertical, considerar os deslocamentos acumulados;
- 2) Considerar os deslocamentos horizontais Leste–Oeste (E–W) e Norte–Sul (N–S);
- 3) Considerar as feições de instabilidade mapeadas (fraturas no terreno e na infraestrutura urbana, afundamentos/deformações do solo, alagamentos, surgências d’água etc.);
- 4) Considerar as características construtivas individuais dos imóveis (idade, qualidade, número de pavimentos, tamanho, número de cômodos etc.);
- 5) Considerar o material de fundação dos imóveis (aterro lançado, aterro compactado, solo mole, solo de alteração da Formação Barreiras etc.);
- 6) Mapear os danos individuais dos imóveis (problemas funcionais, quantidade, extensão, abertura, inclinação e localização de trincas/rachaduras/fendas etc);
- 7) Avaliar e classificar o nível de dano individual dos imóveis; e
- 8) Monitorar a evolução dos danos (fissurômetros) no maior número de edificações possível.

336 **9) Avaliar as distorções vertical e horizontal do terreno, conforme a**
337 **Tabela 9 do relatório. Neste caso, deve-se considerar os**
338 **deslocamentos vertical e horizontal detectados em cada ponto de**
339 **monitoramento.**

340
341 Quanto à afirmação de que não foi seguida metodologia consagrada, seria
342 possível descrever e especificar qual a prática a ser observada?

343 **Considerando que no Brasil o problema de afundamento do solo na cidade**
344 **de Maceió é único, torna-se necessária a busca e integração de estudos**
345 **internacionais para auxiliar na compreensão e nos impactos do fenômeno.**
346 **Neste sentido, foi incluído no relatório um item (seção 4) sobre métodos de**
347 **avaliação de danos em edificações devido ao processo de subsidência,**
348 **baseado em experiências internacionais. Embora esta seção esteja longe**
349 **de esgotar o tema, ela traz importantes contribuições. Dentre elas,**
350 **propostas práticas para o levantamento e avaliação espacial do nível de**
351 **danos em edificações, como indicado nas Tabelas 6 e 9 e Figura 4.**

352 **Além disso, o Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia –**
353 **IBAPE e a norma técnica ABNT NBR 16747 estabelecem diretrizes e**
354 **procedimentos para descrição de danos e a realização de inspeções**
355 **prediais.**

7) Na página 50, consta "(...) além disso, o gráfico mostra que os deslocamentos horizontais estão direcionados consistentemente para leste (valores positivos). De acordo com dados DGNSS, o movimento para leste seria devido ao vetor deslocamento horizontal, que possui sentido sulsudeste (SSE) e estaria relacionado a convergência das cavidades. (...) Na apresentação de agosto de 2025 foi dito que o deslocamento horizontal era no sentido inverso à laguna. O que significa tal análise?

A abordagem MT-InSAR permite medir deslocamentos vertical e horizontal Leste-Oeste (E-W). Por convenção, os deslocamentos no sentido Leste (Av. Fernandes Lima) são positivos e no sentido Oeste (Lagoa Mundaú) são negativos.

A abordagem DGNSS permite medir as componentes de deslocamento vertical, horizontal Leste-Oeste (E-W) e horizontal Norte-Sul (N-S). Portanto, esta abordagem permite resolver o vetor deslocamento 3D.

A Figura 8 do relatório mostra que na área do bairro Bebedouro (Flexais) ocorrem deslocamentos Leste-Oeste (E-W) positivos. Isso indica que os deslocamentos ocorrem no sentido leste (oposto à Lagoa Mundaú e no sentido da Avenida Fernandes Lima).

A Figura 12 do relatório Geoapp (2025) mostra que nesta área o vetor deslocamento aponta para a área das cavidades subterrâneas (Figura 3). Este vetor tem orientação Sul-Sudeste (SSE).

Ao decompormos o vetor deslocamento na sua componente E-W, isso explicaria os deslocamentos positivos para Leste medidos pela interferometria (MT-InSAR). Além disso, este movimento indica relação causal com as cavidades de dissolução de sal-gema.

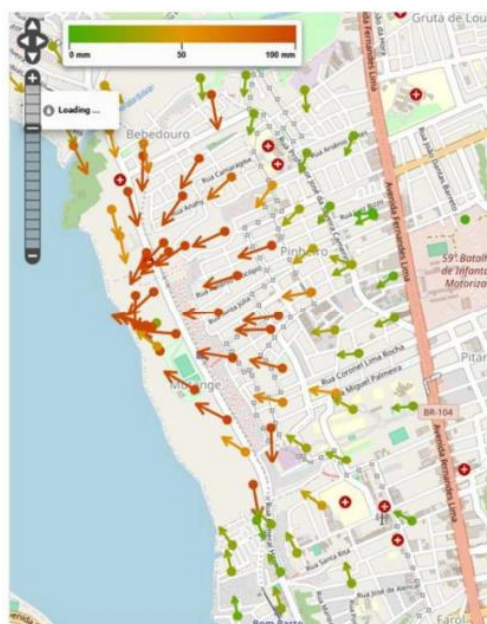


Figura 3 – Mapa dos deslocamentos horizontais. A orientação e a dimensão das setas indicam, respectivamente, o sentido e a magnitude dos movimentos. O norte da imagem está apontado para cima. Fonte: Geoapp (2025).

8) diante dos dados que foram disponibilizados é possível observar algum sinal de desaceleração do processo de subsidência?

Os dados analisados no relatório tiveram como enfoque principal alguns imóveis localizados preferencialmente na periferia do Mapa de Linhas de Ações Prioritárias, conforme solicitação da DPE-AL. Quando se analisa a série histórica completa (junho de 2019 a dezembro de 2024), os dados para estes imóveis revelam que o processo de subsidência ainda está ativo e não mostra sinais claros de estabilização no período. Neste sentido, torna-se necessário manter o monitoramento existente.

9) acerca da recomendação "f" de elaboração de um mapa de nível de danos (por domicílio) de modo a auxiliar na compreensão do impacto do fenômeno de subsidência, poderia descrever em que consistiria e quais os benefícios para a população atingida em relação ao mapa elaborado pela defesa civil?

A Figura 4 do relatório apresenta o mapa de nível de danos em edificações provocado pelo processo de subsidência na cidade de Calatayud, Espanha. Esse mapa ilustra a variação espacial da intensidade dos danos, permitindo identificar zonas com diferentes níveis de impacto e identificar correlações espaciais com os aspectos geológico-geotécnicos.

O Mapa de Linhas de Ações Prioritárias atualmente classifica o território apenas em duas categorias: uma zona condenada (Zona 00), na qual os moradores foram realocados, e uma zona sob monitoramento (Zona 01). Contudo, dentro da Zona 01, os imóveis podem apresentar níveis de dano muito distintos, em função da magnitude e tipo dos deslocamentos (vertical, horizontal ou ambos), bem como das características construtivas (materiais, idade etc.) e características geológico-geotécnicas do solo de fundação.

Assim, imóveis submetidos a deslocamentos semelhantes podem reagir de formas diferentes, refletindo sua vulnerabilidade estrutural. A elaboração de um mapa de níveis de danos por domicílio permitiria representar essas diferenças e avaliar as respostas individuais das edificações ao fenômeno de subsidência.

Do ponto de vista técnico e social, esse produto poderia trazer ganhos em relação ao mapa atual da Defesa Civil, pois:

- Evidenciaria a distribuição espacial da severidade dos danos, funcionando como um indicador direto de impacto sobre a população;**
- Auxiliaria no zoneamento da suscetibilidade à subsidência, ao integrar fatores geológico-geotécnicos e construtivos;**
- Apoiaria o planejamento urbano e as ações de gestão de risco, permitindo priorizar inspeções, monitoramentos e medidas de mitigação em áreas mais vulneráveis.**

Em resumo, o mapa de níveis de danos traduziria a observação pontual de patologias em uma ferramenta cartográfica de gestão, semelhante ao modelo adotado em Calatayud, onde foi possível correlacionar os padrões de danos às condições geológico-geotécnicas e à evolução do processo de subsidência.

483 Colocamo-nos à disposição para qualquer esclarecimento adicional que seja
484 necessário.

485 Atenciosamente,

486

487

488

489

490

491

Marcos Eduardo Hartwig
Departamento de Geologia
Universidade Federal do Espírito Santo

492

493

494