



**TRE**  
**ALTAMIRA**  
A CLS Group Company

# RELATÓRIO TÉCNICO

Maceió, Área Norte  
Atualização 2D SqueeSAR©  
Janeiro de 2024

## Especificações do documento

### Ciente

**Nome:** Braskem  
**Endereço:** Nações Unidas, 4777  
São Paulo, SP

### Referência

**Projeto:** Atualização 2D SqueeSAR® Janeiro de 2024, Maceió, Área de Interesse Norte  
**Ordem de trabalho TRE ALTAMIRA:** JO23-2216-ES  
**Referência TRE ALTAMIRA:** ES7798A042S, ES7798A043S, ES7798A048V, ES7798A049E



### Criado por TRE ALTAMIRA

**Autor:** Vinicius Mendes  
**Verificado por:** Javier García Robles  
**Aprovado por:** Stefano Cespa  
**Data:** 29/02/2024  
**Versão:** 1.0



Handwritten signature of Vinicius Mendes  
Handwritten signature of Stefano Cespa  
Circular stamp of TRE ALTAMIRA logo

## **Aviso de confidencialidade**

Este documento contém informações confidenciais e está dirigido exclusivamente ao destinatário. O conteúdo desse documento, inclusive a informação relacionada à metodologia TRE ALTAMIRA, não podem ser revelados parcialmente, ou em sua totalidade, a qualquer terceiro, por qualquer meio utilizado para outro propósito sem a autorização expressa por escrito da TRE ALTAMIRA.

## Índice

<b>1. Introdução.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Área de interesse e imagens processadas .....</b>	<b>7</b>
2.1. Análise SqueeSAR® .....	8
2.1.1. Aceleração .....	13
2.2. Resultados na geometria 2D .....	16
2.2.1. Pinheiro – Mutange .....	16
2.2.2. Bom Parto – Levada.....	48
<b>3. Conclusões .....</b>	<b>52</b>
<b>Apêndice A – Dados Entregues.....</b>	<b>54</b>
<b>Apêndice B – Descrições de Legendas .....</b>	<b>57</b>
<b>Apêndice C – Descrições Técnicas.....</b>	<b>59</b>

## Acrônimos e abreviaturas

AOI	Área de interesse ( <i>Area Of Interest</i> )
InSAR	Interferometria de radar de abertura sintética
DInSAR	Interferometria de radar de abertura sintética diferencial
LOS	<i>Line-of-sight</i> , linha de visada do satélite (vetor de medição)
SAR	Sensor radar de abertura sintética ( <i>Synthetic Aperture Radar</i> )
SqueeSAR®	Algoritmo para o processamento DInSAR
TSX	Satélite TerraSAR-X
MP	Pontos de medição
PS	<i>Permanent Scatterer</i> ou Ponto Permanente
DS	<i>Distributed Scatterer</i> ou Ponto Distribuído
REF	Ponto de Referência
TS	<i>Time Series</i> ou Série Temporal
TREA	TRE ALTAMIRA

## 1. Introdução

A Braskem solicitou à TRE ALTAMIRA um estudo de monitoramento dos deslocamentos do terreno, englobando as áreas onde a Braskem operava na cidade de Maceió, através do processamento de imagens de radar de alta resolução, banda X, captadas pelo satélite TerraSAR-X, utilizando a técnica própria SqueeSAR®.

SqueeSAR® é uma técnica patenteada pela TRE ALTAMIRA que processa multi-interferogramas e consegue medições dos deslocamentos do terreno com alta precisão. Isto é possível através do processamento multi-temporal de imagens de satélite SAR adquiridas numa mesma área a longo do tempo. Trata-se de uma técnica que extrai informação estatística das imagens; SqueeSAR® identifica alvos no terreno (naturais ou antrópicos) e, para cada um, fornece séries temporais de deslocamento e a relação de deslocamento médio no período monitorado, com precisão milimétrica.

O projeto de monitoramento consiste nos seguintes pacotes de serviços:

- **Estudo da linha base inicial:** processamento SqueeSAR® de todas as imagens ascendentes adquiridas de julho de 2018 até maio 2019, com o objetivo de entregar à Braskem uma visão geral dos deslocamentos que afetam a área de interesse;
- **Estudo de monitoramento inicial:** cinco atualizações/entregas mensais dos dados de deslocamento usando imagens adquiridas na órbita ascendente (geometria simples) do satélite no período de julho de 2019 a dezembro de 2019;
- **Estudo da linha base ascendente + descendente:** processamento SqueeSAR® de todas as imagens adquiridas nas órbitas ascendentes e descendentes (dupla geometria) do satélite adquiridas até janeiro de 2020, mais a decomposição Vertical e Leste-Oeste do movimento;
- **Estudo de monitoramento:** sessenta e três (63) atualizações/entregas mensais em dupla geometria, mais a decomposição Vertical e Leste-Oeste do movimento, sendo as 17 primeiras realizadas até junho de 2021 (1º contrato), 24 realizadas até junho de 2023 (2º contrato) e as demais 22 a serem realizadas até abril de 2025 (3º contrato).

Este documento consiste no relatório técnico referente à atualização de janeiro de 2024 dos resultados em geometrias ascendente e descendente e decomposição Vertical e Leste-Oeste. Para esta atualização, foram inclusas nos resultados produzidos as ortofotos disponibilizadas pela Braskem, a fim de melhorar a visualização das análises. Descrevem-se para a AOI Norte: imagens adquiridas, análises feitas e resultados obtidos.

## 2. Área de interesse e imagens processadas

A área de interesse - AOI Norte - cobre ~18,6 km<sup>2</sup> e inclui os bairros Pinheiro, Chã da Jaqueira, Mutange, Bebedouro etc. (Figura 1). As características do terreno e as instalações na área tornaram possível obter uma alta densidade de MPs.



Figura 1: AOI Norte da Braskem, Maceió.

O estudo foi realizado usando imagens de radar na banda X do satélite TerraSAR-X (TSX), caracterizado por adquirir imagens a cada 11 dias e por uma alta resolução espacial (3 x 3 metros). Para esta atualização 2D, foram utilizadas 152 imagens do satélite TerraSAR-X em geometria ascendente e 156 imagens em geometria descendente, cobrindo o período de junho de 2019 a janeiro de 2024. A distribuição temporal das imagens incluídas no processamento de dezembro está destacada na Figura 2 e Figura 3.

<b>Time range</b>	2019-06-21	2024-01-29
<b>Number of scenes</b>	152	

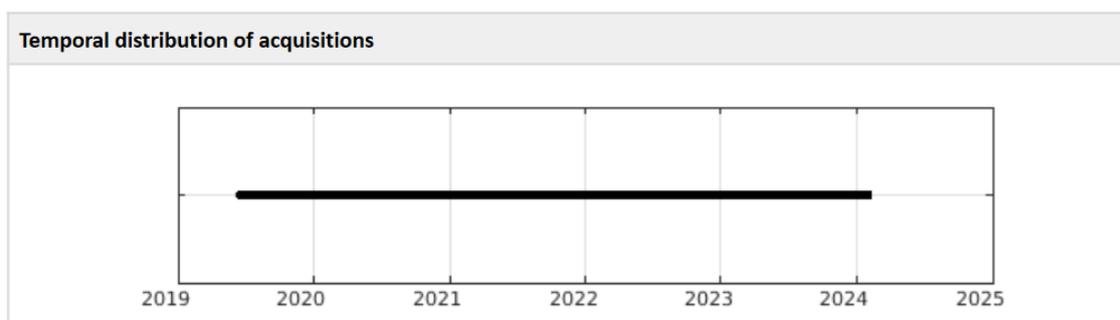


Figura 2: Dataset processado e distribuição temporal das imagens do TerraSAR-X ascendente.

<b>Time range</b>	2019-06-18	2024-01-26
<b>Number of scenes</b>	156	

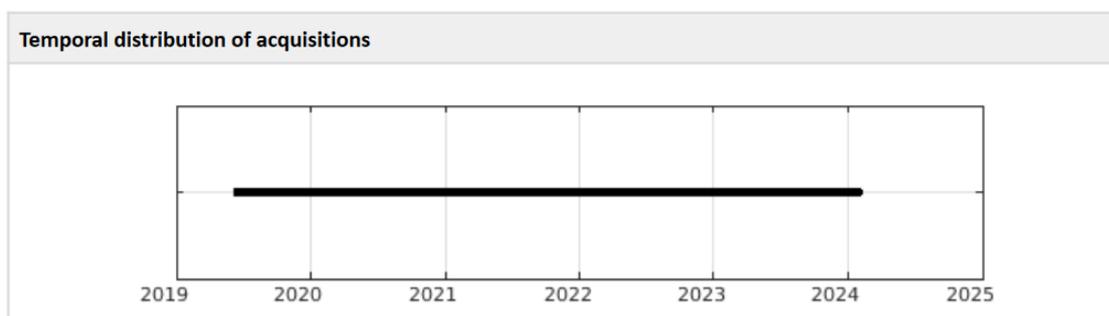


Figura 3: Dataset processado e distribuição temporal das imagens do TerraSAR-X descendente.

## 2.1. Análise SqueeSAR®

A análise SqueeSAR® inclui o processamento em LOS das geometrias ascendente e descendente e a decomposição vetorial 2D do movimento nos pontos coincidentes em ambas as geometrias LOS.

Os detalhes da técnica são descritos em detalhe e explicam as terminologias utilizadas no Apêndice C – Descrições Técnicas. A Tabela 1 mostra o número total de pontos de medição (MP) identificados na área de interesse (AOI) Norte e a respectiva densidade.

Vale ressaltar que o resultado na geometria ascendente apresenta desvio padrão menor que o da geometria descendente, apesar de o número de imagens nas duas geometrias ser muito próximo, 152 e 156, respectivamente, isto ocorre, muito provavelmente, devido à diferença no horário de aquisição das imagens, 17:38 (*local time*) em ascendente e 05:09 (*local time*) em descendente, dado que a atmosfera é mais estática durante à noite do que ao longo do dia (as condições atmosféricas mudam rapidamente com o tempo e as imagens podem ter APS – *Atmospheric Phase Screens* – completamente diferentes de uma passagem para outra do satélite). Sendo assim, a imagem adquirida nas primeiras horas da noite (passagem ascendente) sofre menos interferência das turbulências da atmosfera do que a imagem adquirida no início do dia e, desta forma, as medidas InSAR apresentam menos ruídos e, portanto, são mais precisas. Destaca-se, contudo, que o desvio padrão das medidas pode variar dentro de um intervalo de 0.1 a 5 mm/ano, sendo que, no caso destes resultados, ambas as geometrias se encontram com precisão inferior a 1 mm/ano, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Estatísticas do processamento obtidas da análise das imagens TSX em ascendente, descendente e 2D.

Satélite	Geometria	# imagens	# de MP	MP / KM <sup>2</sup>	St. Dev. VEL (mm/ano)
TSX	Ascendente	152	923.119	59.611	0,31
TSX	Descendente	156	870.258	56.197	0,35
TSX	2D - VERT	306	98.062	6.332	0,25
TSX	2D – EAST-WEST	306	98.062	6.332	0,47

Vale destacar, ainda, que, mesmo com alta densidade de pontos, a presença de vegetação, áreas de agricultura ou dinâmicas que causem mudança na refletividade do terreno (tais como, obras, escavações, deposições, terraplanagens etc.), resultam na obtenção de menos pontos em algumas áreas. Na área da margem da lagoa e encosta, onde está ocorrendo atividades que ocasionam alteração da dinâmica do terreno, como demolição e terraplenagem, a TREA está realizando uma análise adicional para identificar os pontos que estão tendo a qualidade afetada e estes são

removidos dos resultados. Vale ressaltar que ainda há uma quantidade significativa de pontos de medição, dado que a área ainda não foi coberta de vegetação, e por esta razão o monitoramento da região ainda não foi comprometido.

Os deslocamentos obtidos são vinculados ao Ponto de Referência (REF), supondo que o ponto é completamente estável. A Tabela 2 descreve os códigos (CODE) e as coordenadas dos REF para o conjunto de dados ascendente, descendente e 2D localizadas na AOI Norte de Maceió.

Tabela 2: Código e localização geográfica do ponto de referência para a geometria ascendente, descendente e 2D.

	CODE	Longitude	Latitude
<b>Ascendente</b>	BM6J1S2	-35,73434	-9,62099
<b>Descendente</b>	BT9XYEQ	-35,73785	-9,62242
<b>2D</b>	A7IASVX	-35,73783	-9,62232

Nas imagens seguintes são mostrados os mapas de deslocamento anual nas órbitas ascendente e descendente (Figura 4 e Figura 5, respectivamente). Os MPs têm um código de cor conforme o deslocamento (mm) detectado, onde, valores positivos indicam movimento de aproximação ao satélite na LOS e valores negativos indicam movimento de afastamento, ou distanciamento, em relação ao satélite na LOS. Áreas sem deslocamento significativo são representados na cor verde.

A criação e representação das legendas dos mapas de deslocamento em ASC e DESC é explicada em maior detalhe no Apêndice B – Descrições de Legendas.



**TRE**  
**ALTAMIRA**  
A CLS Group Company

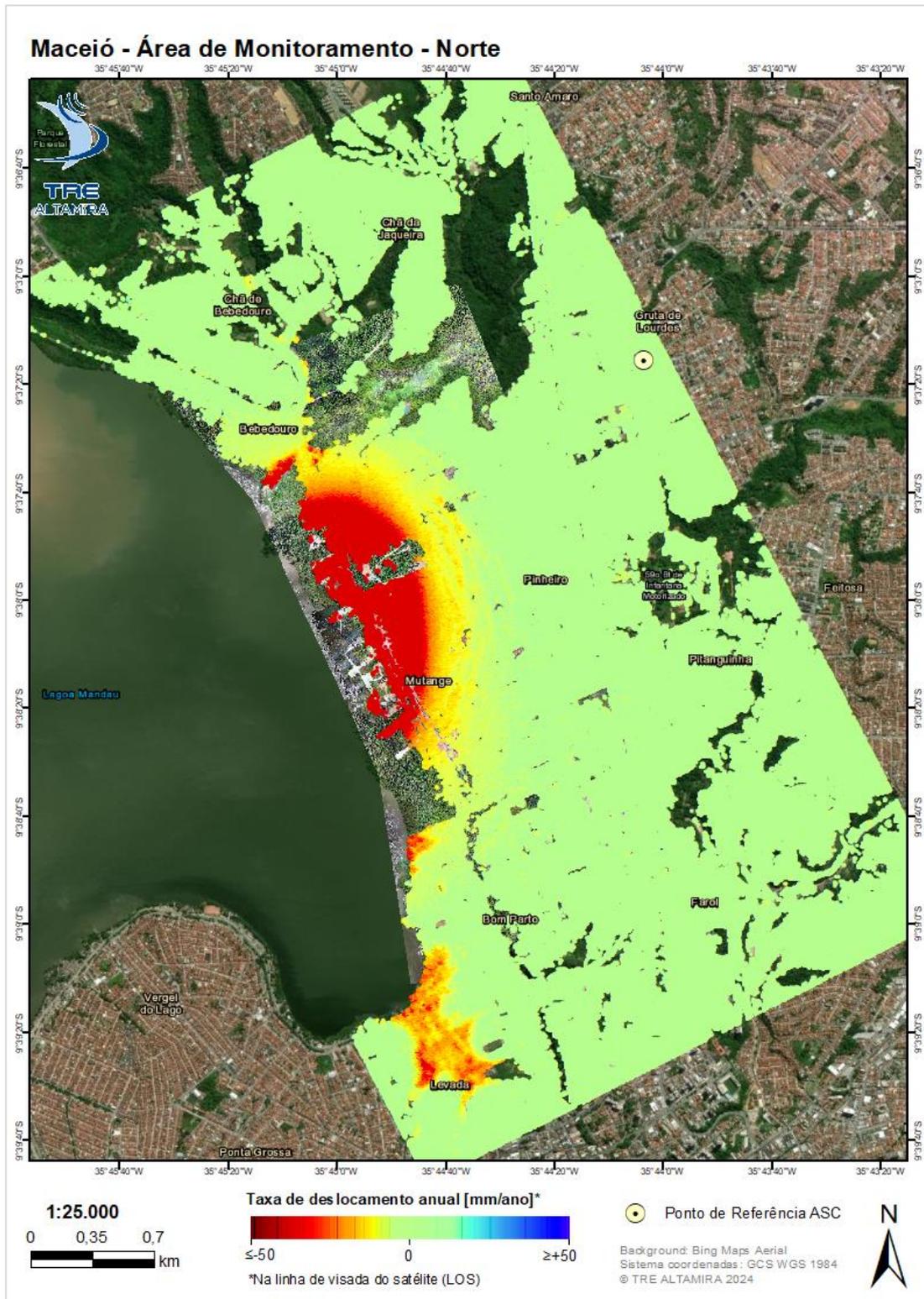


Figura 4: Atualização SqueeSAR® referente ao período de junho de 2019 a janeiro de 2024. Mapa do deslocamento anual em Ascendente, AOI Norte.

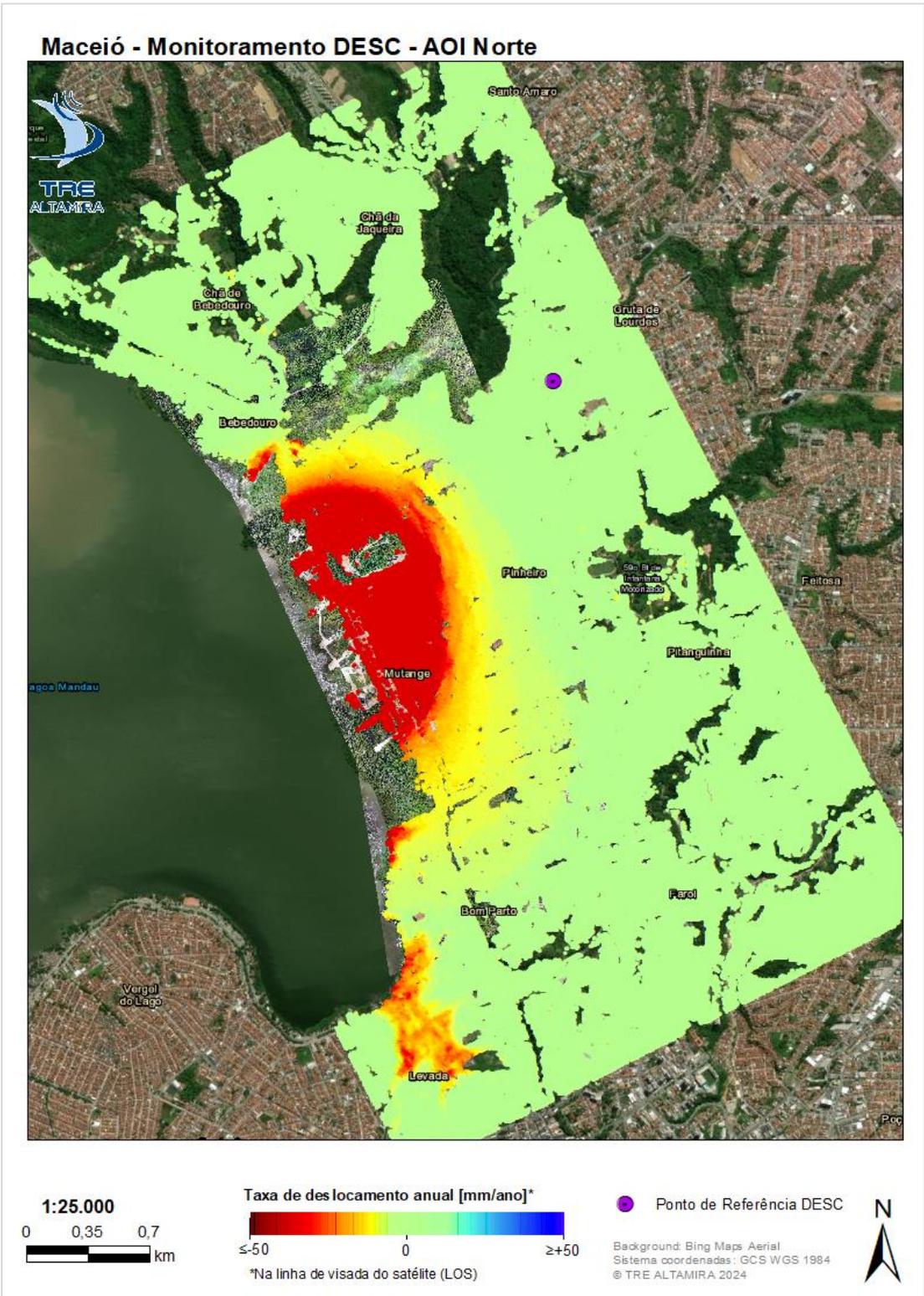


Figura 5: Atualização SqueeSAR® referente ao período de junho de 2019 a janeiro de 2024. Mapa do deslocamento anual em Descendente, AOI Norte.

### **2.1.1. Aceleração**

A análise da aceleração dos deslocamentos permite detectar áreas onde a tendência de deslocamento está mudando.

A Figura 6 e a Figura 7 mostram os mapas de aceleração Ascendente e Descendente, respectivamente, obtidos para a atualização deste mês. A criação e representação das legendas dos mapas de aceleração em ASC e DESC é explicada em maior detalhe no Apêndice B – Descrições de Legendas.

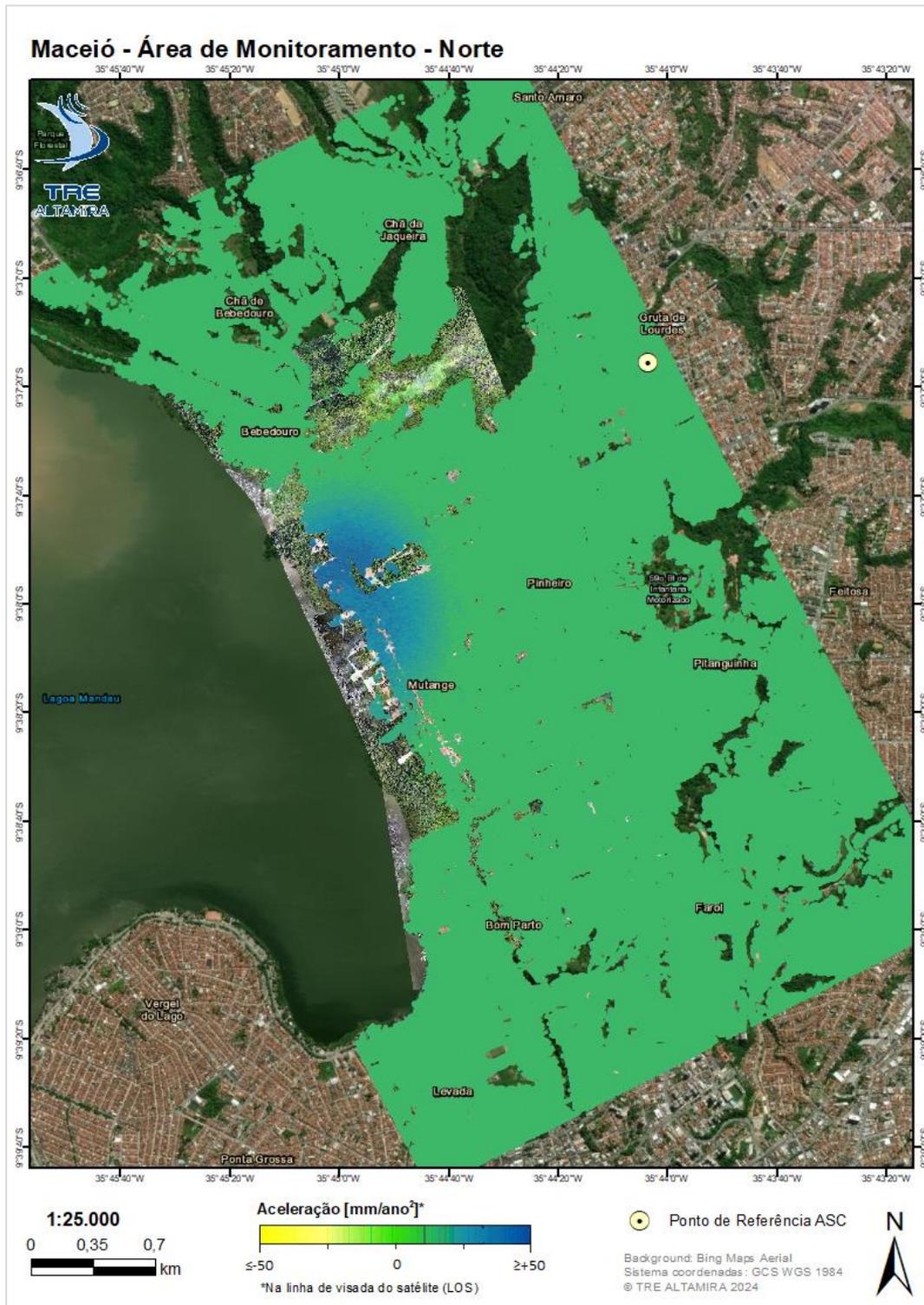


Figura 6: Atualização SqueeSAR® referente ao período de junho de 2019 a janeiro de 2024. Mapa Ascendente de aceleração, AOI Norte

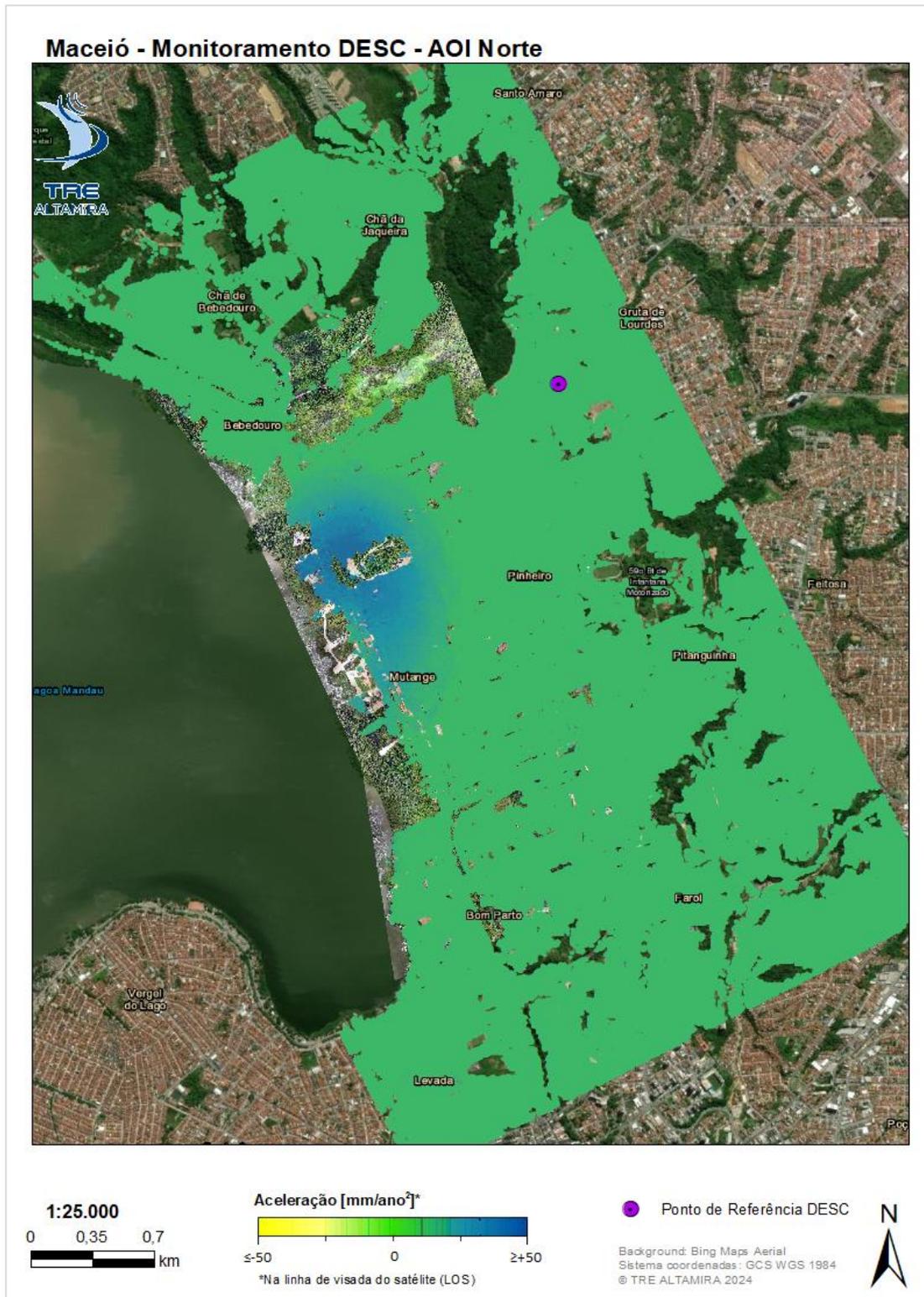


Figura 7: Atualização SqueeSAR® referente ao período de junho de 2019 a janeiro de 2024. Mapa Descendente de aceleração, AOI Norte.

## **2.2. Resultados na geometria 2D**

Na AOI Norte, existem dois focos principais de movimento, sendo as áreas mais proeminentes a dos bairros Pinheiro e Mutange e suas adjacências (Farol e Flexal). Bom Parto e Levada também apresentam movimento significativo, porém de menor magnitude em relação a área anterior. Para a área de Pinheiro-Mutange, há movimentação significativa em ambas as componentes, vertical e horizontal, enquanto na área de Bom Parto-Levada há apenas movimentação significativa na componente vertical.

Como Pinheiro-Mutange apresenta maior variação e intensidade de movimentos, foram elaborados mapas de deslocamento cumulativo diferencial para as duas componentes (vertical, horizontal) que englobam períodos de um ano, três meses, e um mês, a fim de destacar áreas que tenham maior incremento no movimento nos períodos selecionados de maneira mais clara, como também detectar áreas que possam apresentar mudanças na tendência de movimentação. Para a região de Bom Parto-Levada, foram utilizados apenas o mapa anual de deslocamento acumulado, devido a sua baixa variação de tendência e intensidade de deslocamento.

Os dados de Pinheiro-Mutange acompanham suas respectivas séries temporais nos polígonos de monitoramento, assim como seções transversais detalhando a distribuição geométrica da deformação na área, em direções norte-sul e noroeste-sudeste.

### **2.2.1. Pinheiro – Mutange**

Os bairros Pinheiro e Mutange compreendem a área com maior deslocamento geral na área de interesse. A Figura 13 mostra o detalhe sobre esta área e o deslocamento vertical em escala de cores. Este deslocamento é progressivo, sendo maior na margem da lagoa, incluindo a região onde a Braskem operava.

Na subseção 2.2.1.1, serão apresentados os mapas de deslocamento cumulativo diferenciais anuais, trimestrais, e mensais para a componente vertical, assim como o mapa de deslocamento cumulativo vertical para o período de um ano com os polígonos de monitoramento sobrepostos e as séries temporais para cada polígono apresentadas em seguida. A subseção 2.2.1.2 apresentará os mesmos mapas e séries temporais para a componente horizontal do movimento registrado na área.

#### **2.2.1.1. Resultados – Geometria Vertical**

A seguir, temos os mapas de deslocamento cumulativo anuais, trimestrais e mensais (Figura 8, Figura 9, e Figura 10) para a componente vertical.

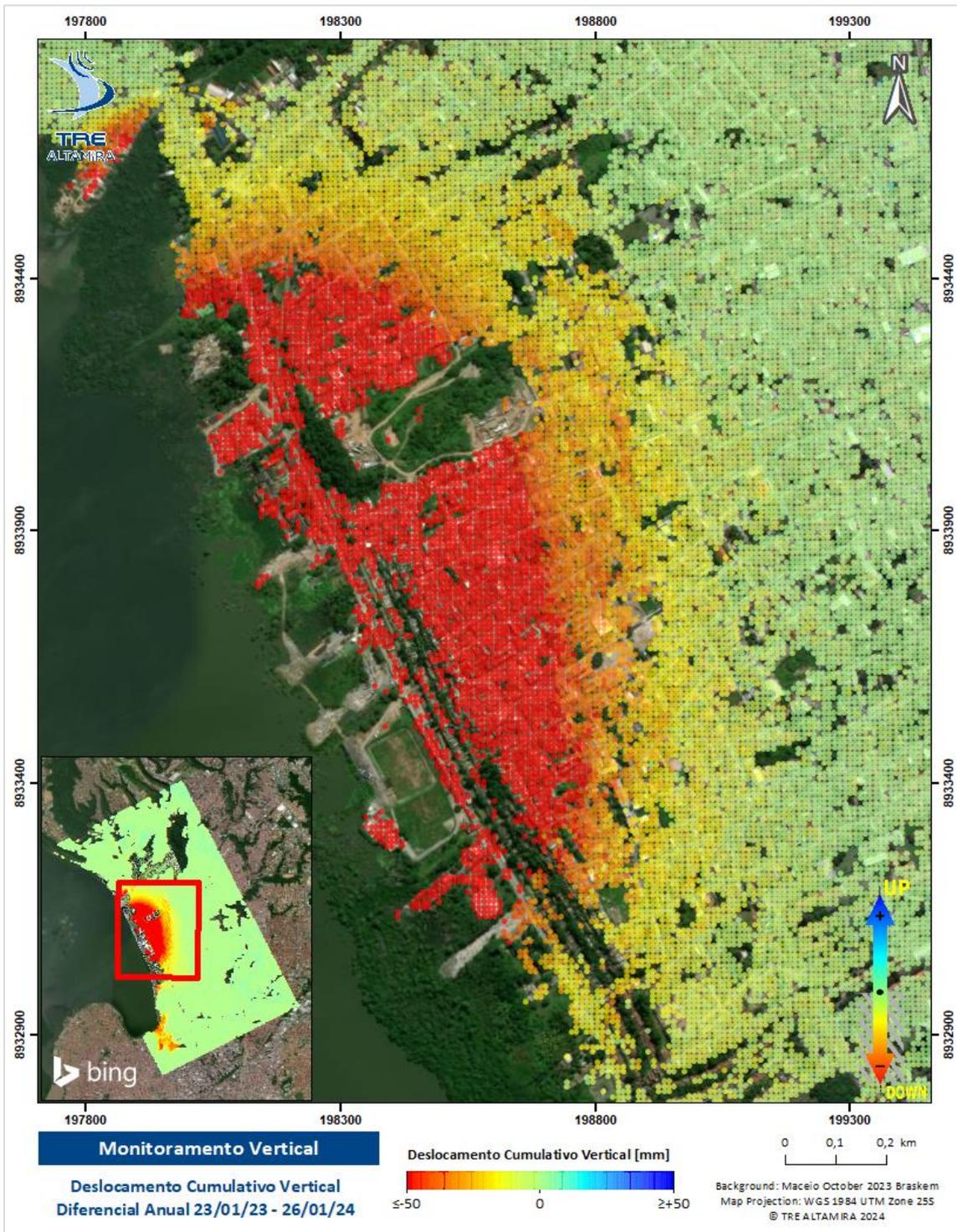


Figura 8: Mapa de deslocamento cumulativo anual [VERT] para a área de Pinheiro-Mutange; período de janeiro de 2023 a janeiro de 2024.

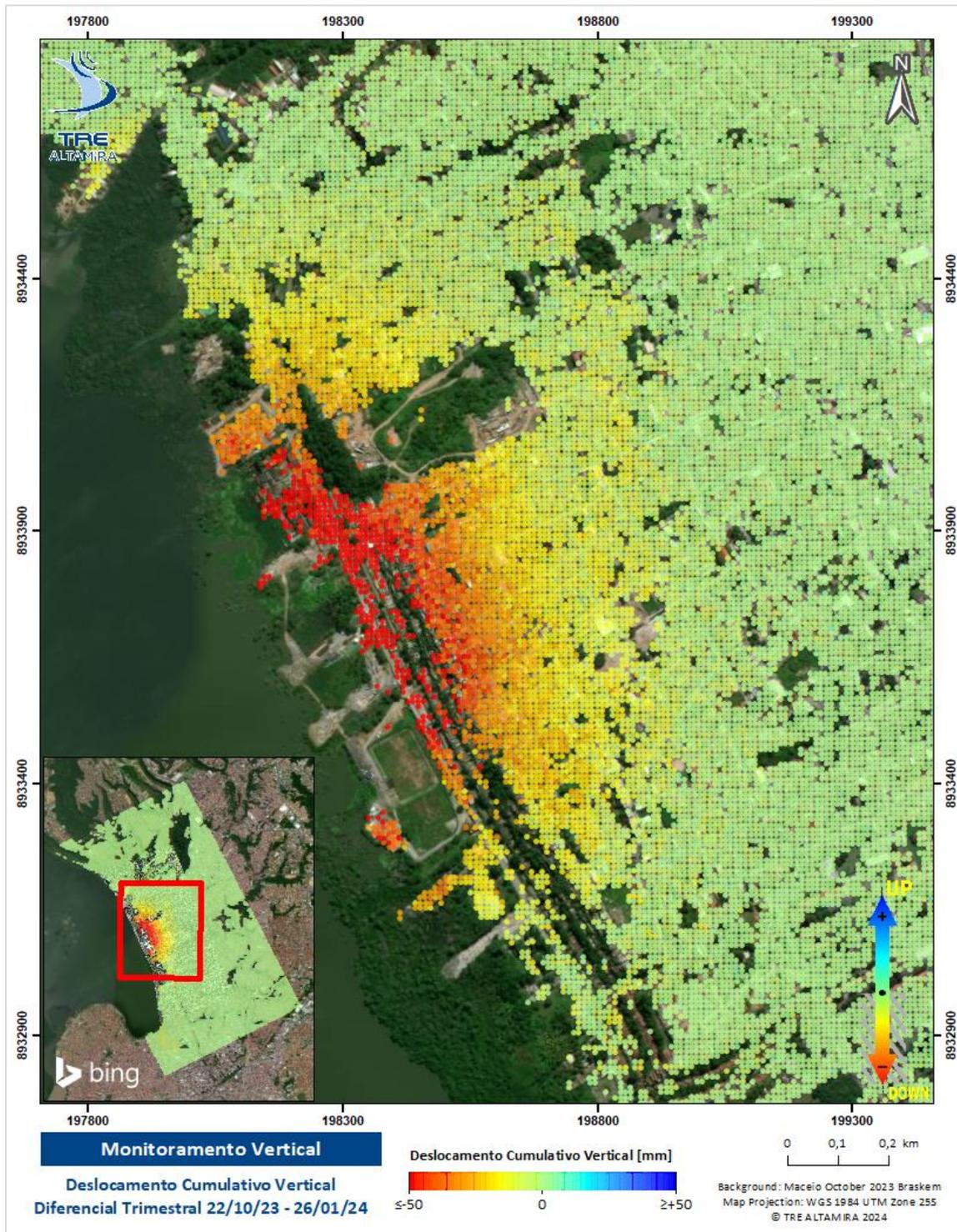


Figura 9: Mapa de deslocamento cumulativo trimestral [VERT] para a área de Pinheiro-Mutange; período de outubro de 2023 a janeiro de 2024.

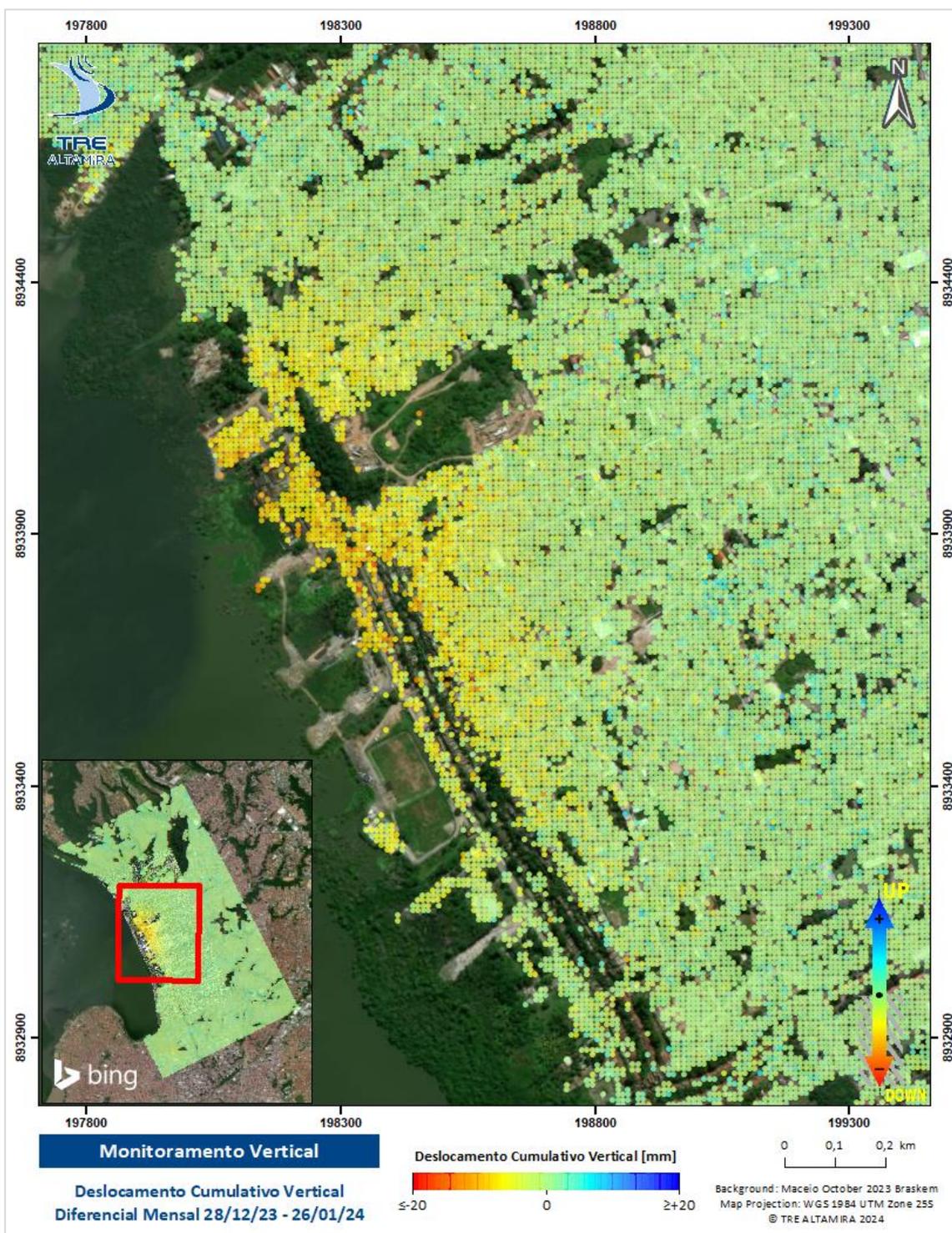


Figura 10: Mapa de deslocamento cumulativo mensal [VERT] para a área de Pinheiro-Mutange; período de dezembro de 2023 a janeiro de 2024.

Nos mapas de deslocamento cumulativo podemos observar que no período de um ano há um gradiente de deformação significativo na região. A partir dos últimos três meses, o gradiente se concentra nas margens da Lagoa Mundaú, sugerindo um máximo local de deslocamento neste período; para o mapa de deslocamento cumulativo diferencial mensal, a concentração de deslocamento continua na mesma região que os anteriores, porém sem um máximo local detectável, indicando a estabilização do movimento, sem mudanças abruptas na tendência.

Na Figura 11 e Figura 12 temos as seções transversais para a velocidade vertical na área do foco de deslocamento em Pinheiro-Mutange. As seções têm, aproximadamente, orientações norte-sul e noroeste-sudeste, respectivamente e comparam os períodos de estudo completo (junho de 2019 a janeiro de 2024), trimestral (outubro de 2023 a janeiro de 2024) e mensal (dezembro de 2023 a janeiro de 2024). A concentração de deslocamento na margem da Lagoa Mundaú vai se reduzindo progressivamente conforme se distancia da margem, como visto na Figura 12.

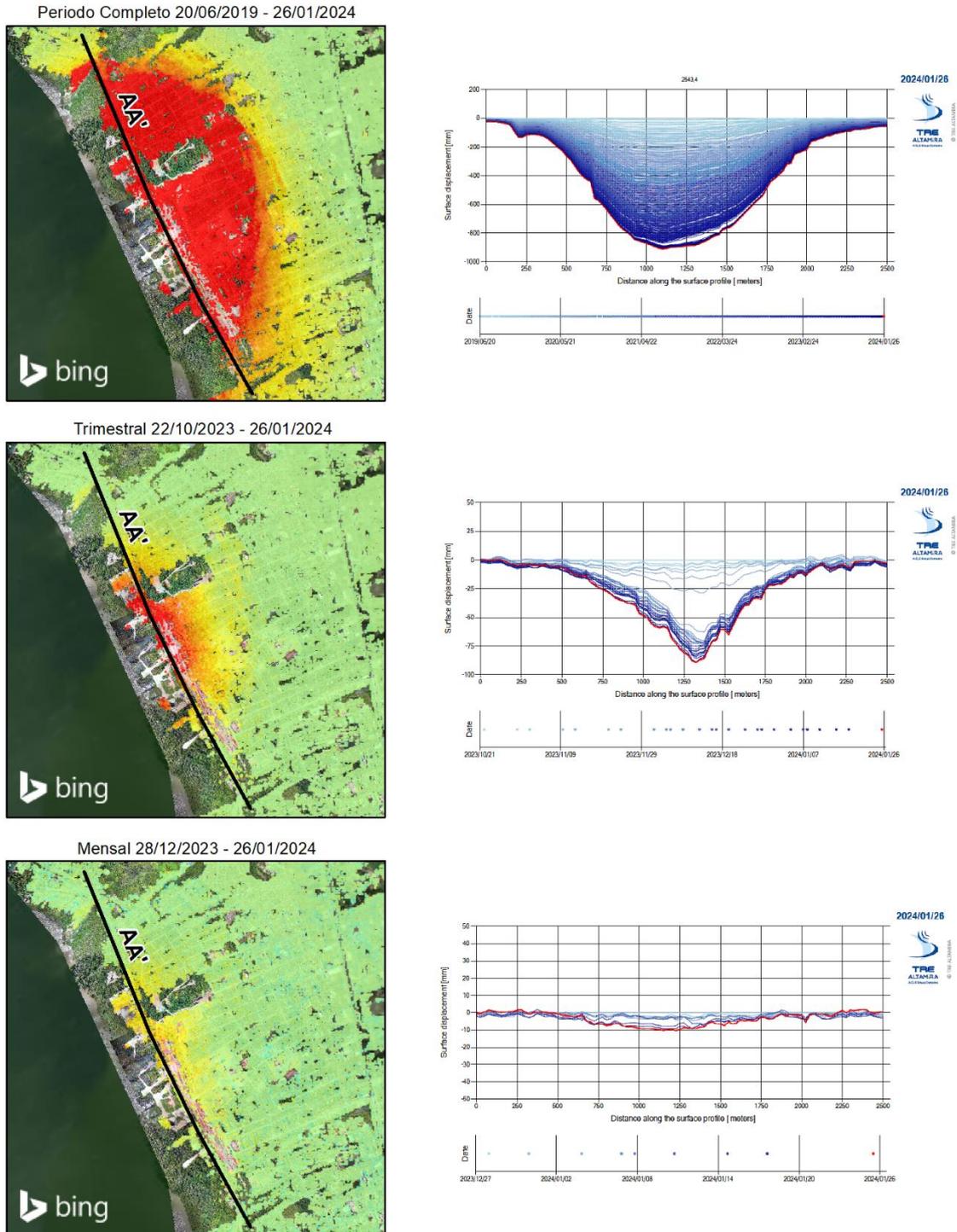


Figura 11: Seções transversais do deslocamento vertical (períodos anual, trimestral e mensal) traçadas sobre o foco central de deformação, na direção norte-sul, em Pinheiro-Mutange, AOI Norte. As linhas mais escuras representam atualizações mais recentes

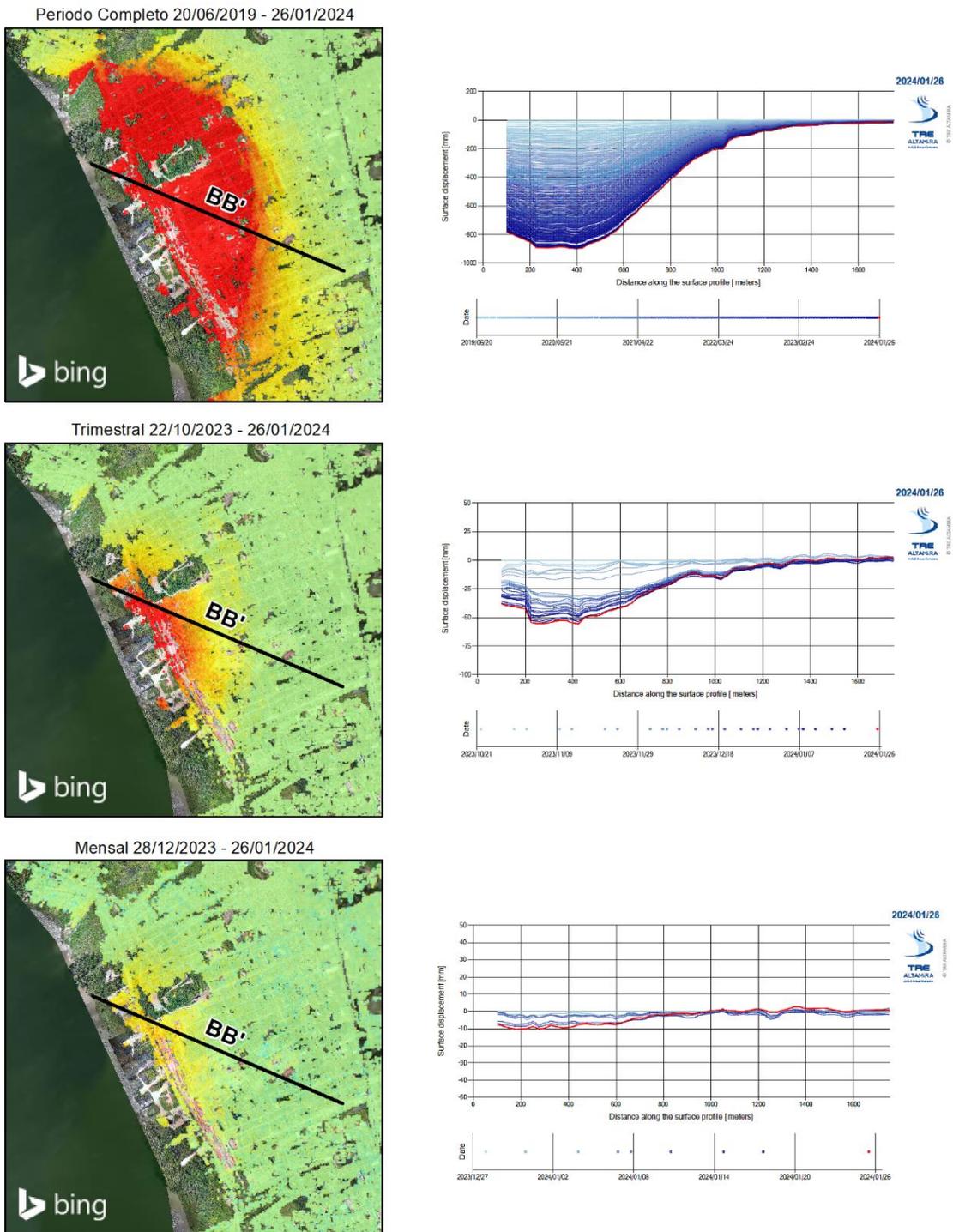


Figura 12: Seções transversais do deslocamento vertical (períodos anual, trimestral e mensal) traçadas sobre o foco central de deformação, na direção noroeste-sudeste, em Pinheiro-Mutange, AOI Norte As linhas mais escuras representam atualizações mais recentes

A seguir, na Figura 13, a representação do mapa de velocidade, no período de um ano, com os polígonos de monitoramento da região e suas respectivas séries temporais. A Figura 14 mostra as TSs médias dos polígonos de monitoramento da área, para o período de um ano.

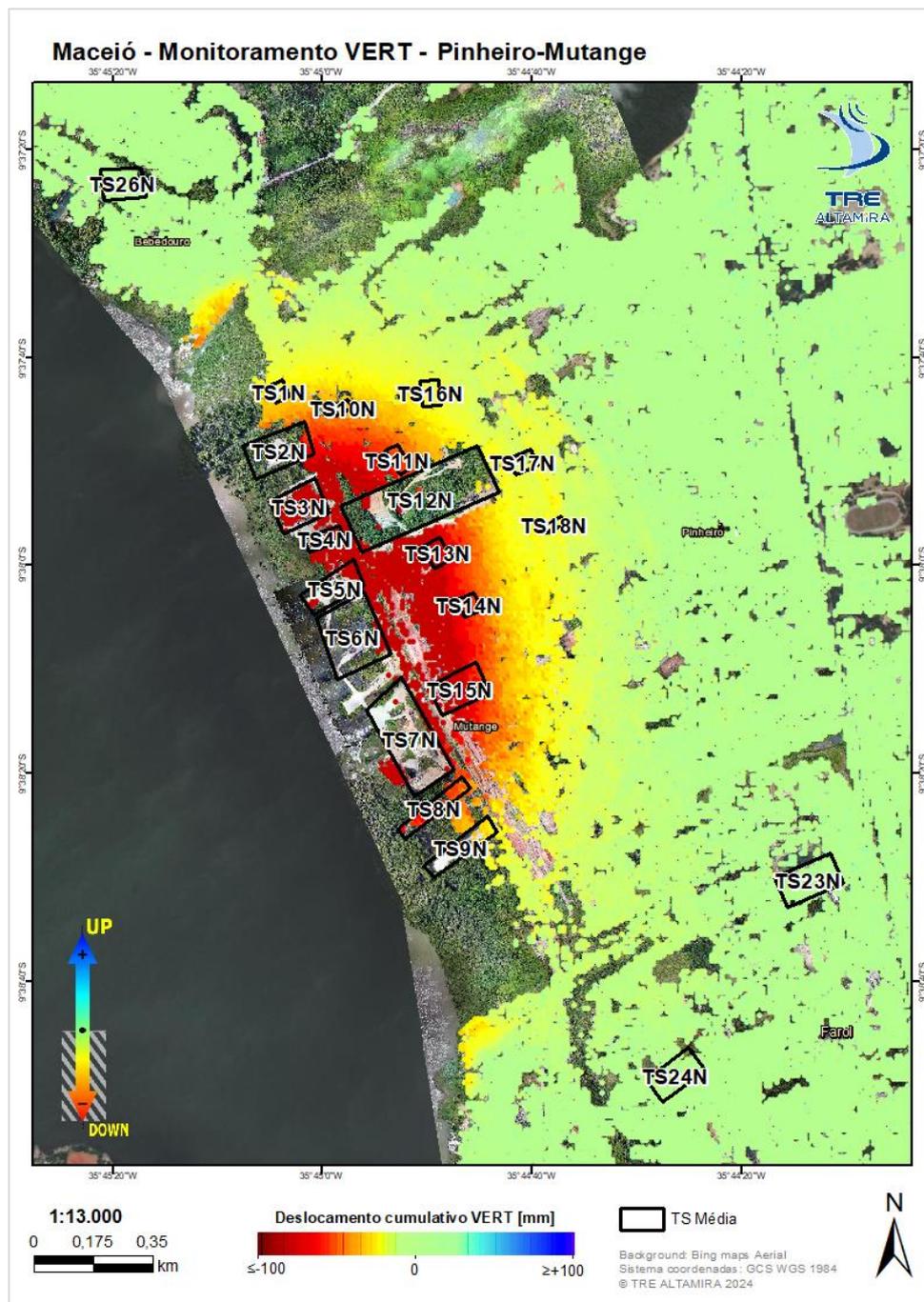
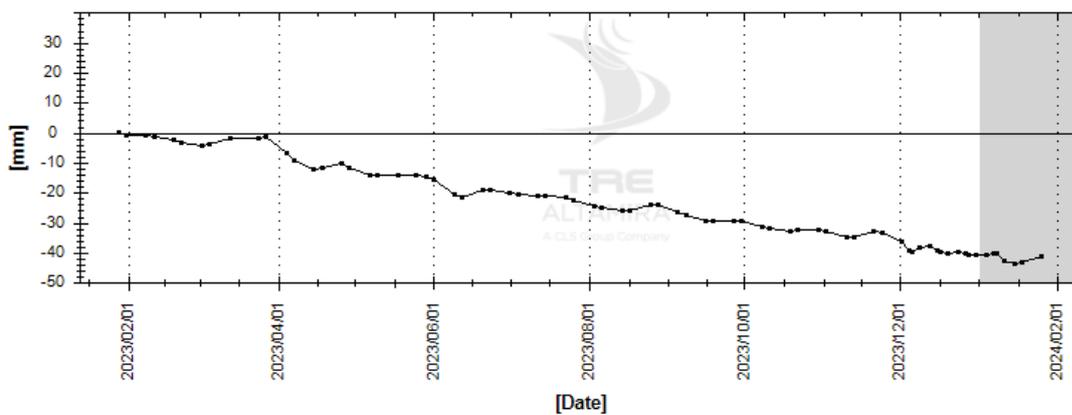


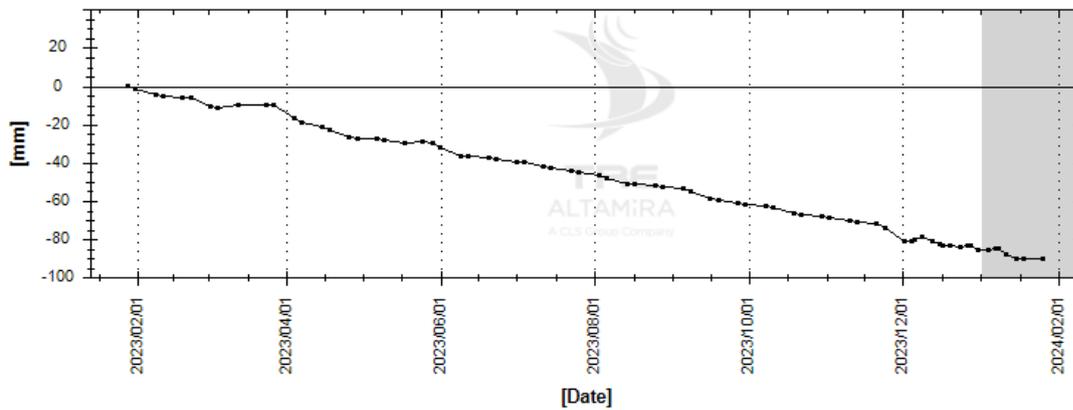
Figura 13: Detalhe de deslocamentos Verticais obtidos mediante à análise SqueeSAR® (janeiro de 2023 a janeiro de 2024) sobre os bairros Pinheiro e Mutange, AOI Norte.

Neste período, TS1N a TS18N apresentam tendência linear de velocidade; os maiores valores médios registrados foram em TS6N, chegando a -205,80 mm de deslocamento cumulativo e velocidade de -205,60 mm/ano; já os polígonos TS23N, TS24N e TS26N apresentam movimento de baixíssima magnitude, com o polígono TS24N tendo maior valor dentre os três, com velocidade - 3,10 mm/ano. Tais tendências de movimentação na área continuarão a ser observadas nas atualizações seguintes.

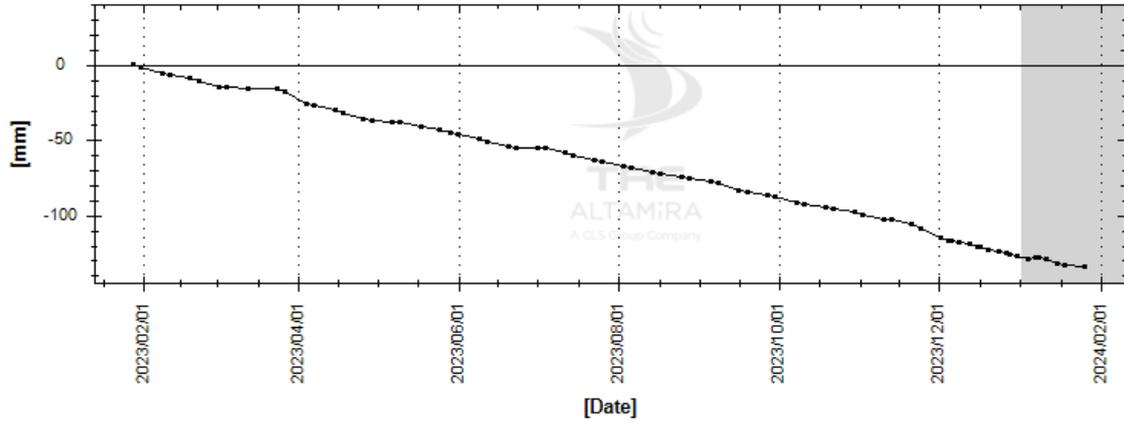
**TS1N - deformation rate: -43,89 - deformation rate standard deviation: 0,50  
cumulative displacement: -41,40**



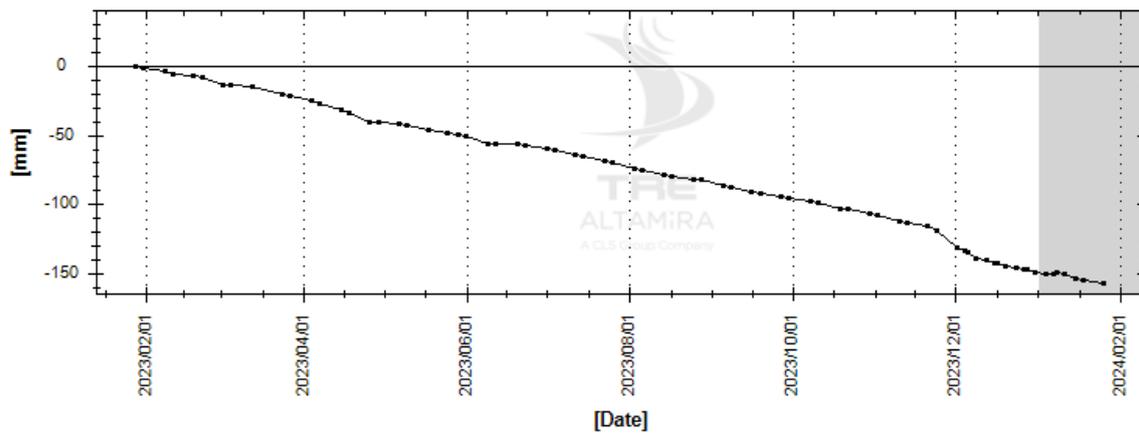
**TS2N - deformation rate: -90,66 - deformation rate standard deviation: 1,00  
cumulative displacement: -90,20**



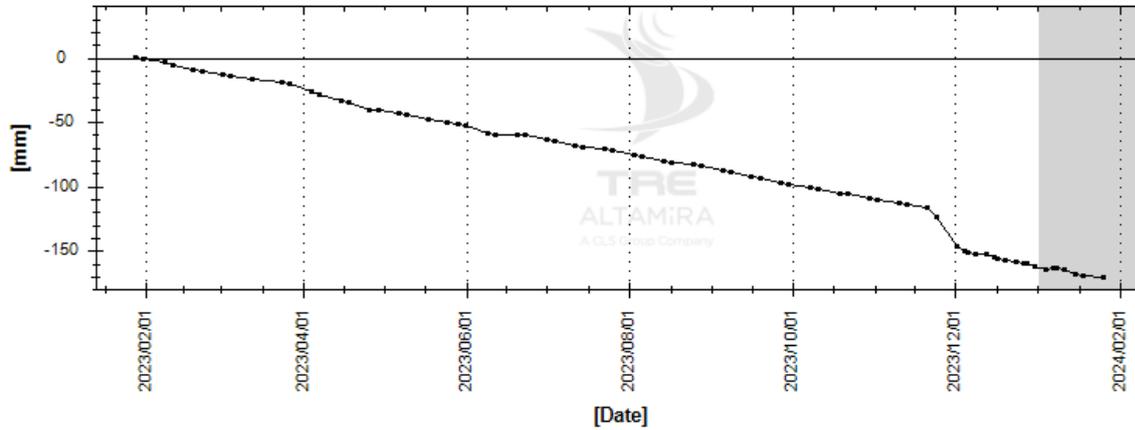
**TS3N - deformation rate: -134,79 - deformation rate standard deviation: 1,10  
cumulative displacement: -134,40**



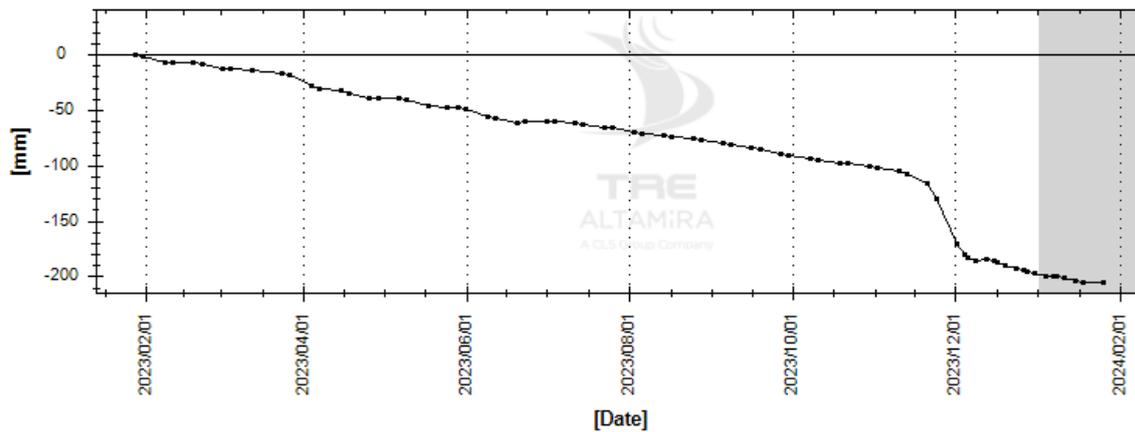
**TS4N - deformation rate: -157,88 - deformation rate standard deviation: 1,00  
cumulative displacement: -157,00**



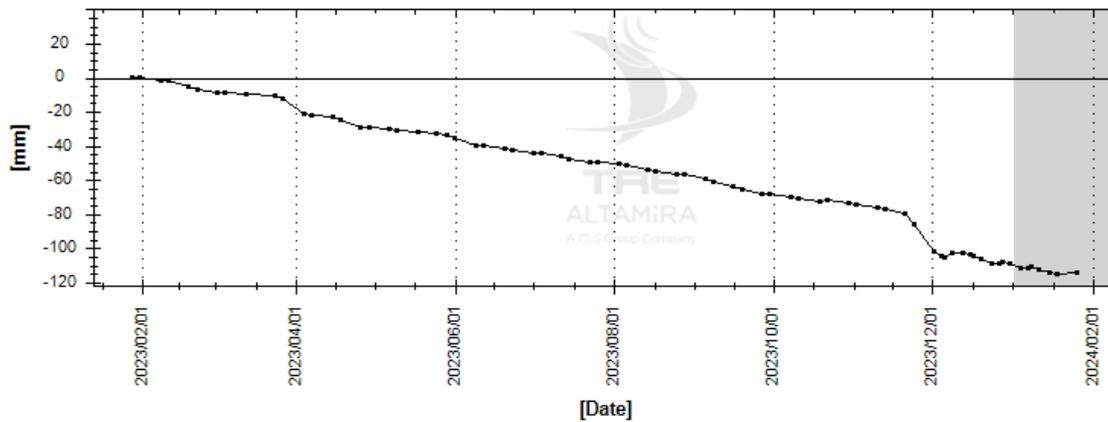
**TS5N - deformation rate: -171,86 - deformation rate standard deviation: 1,00  
cumulative displacement: -170,30**



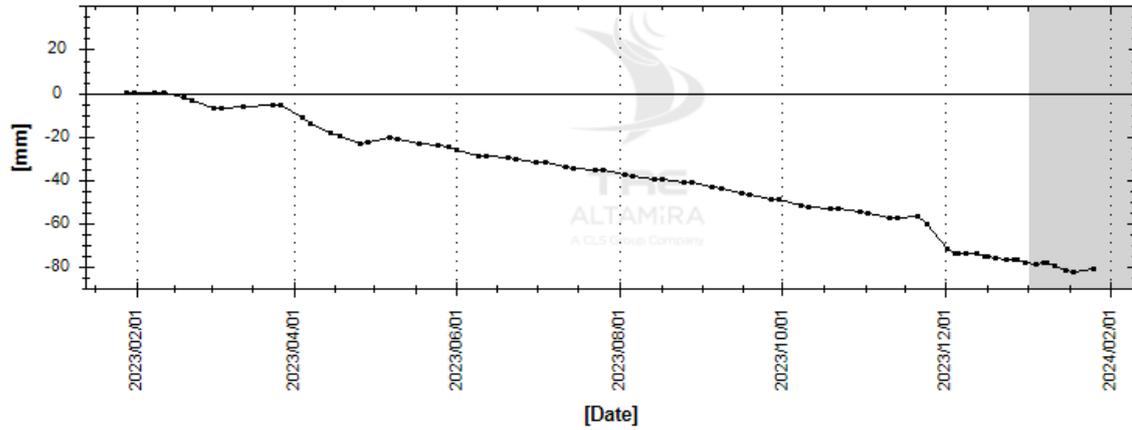
**TS6N - deformation rate: -205,60 - deformation rate standard deviation: 1,00  
cumulative displacement: -205,80**



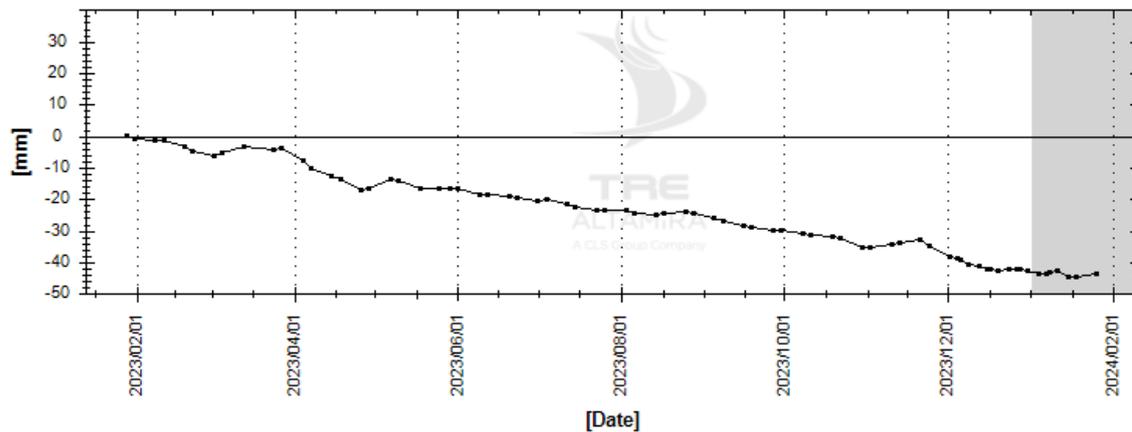
**TS7N - deformation rate: -116,89 - deformation rate standard deviation: 0,70  
cumulative displacement: -114,00**



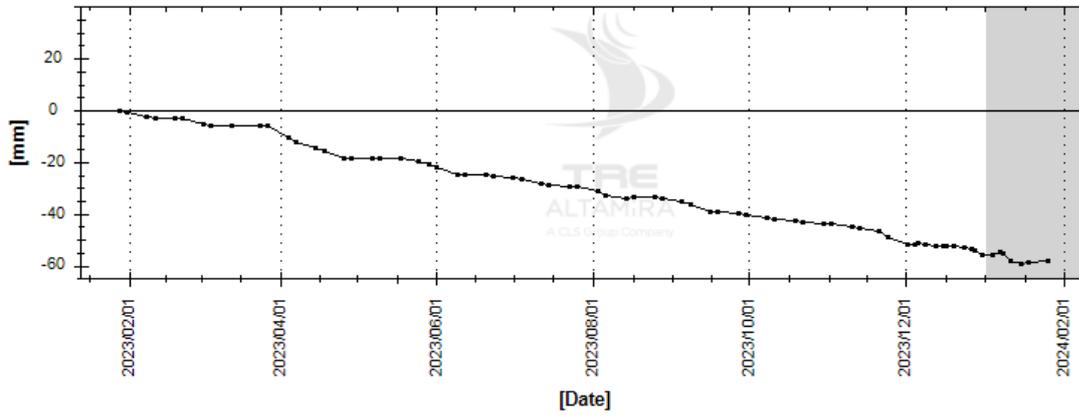
**TS8N - deformation rate: -84,15 - deformation rate standard deviation: 0,40  
cumulative displacement: -81,00**



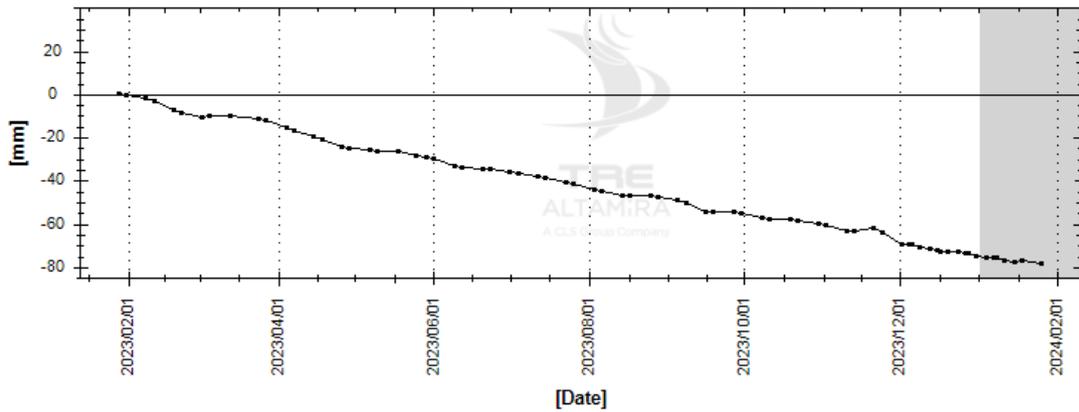
**TS9N - deformation rate: -44,35 - deformation rate standard deviation: 0,30  
cumulative displacement: -43,80**



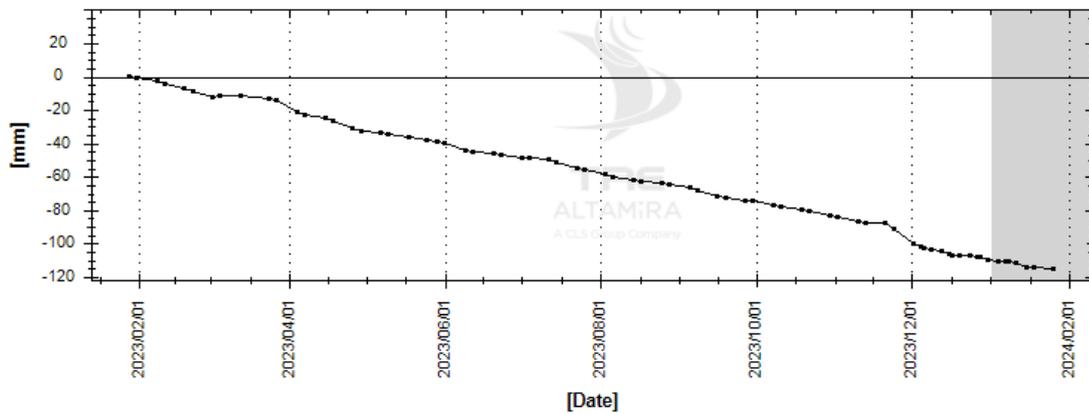
**TS10N - deformation rate: -58,64 - deformation rate standard deviation: 0,80  
cumulative displacement: -58,50**



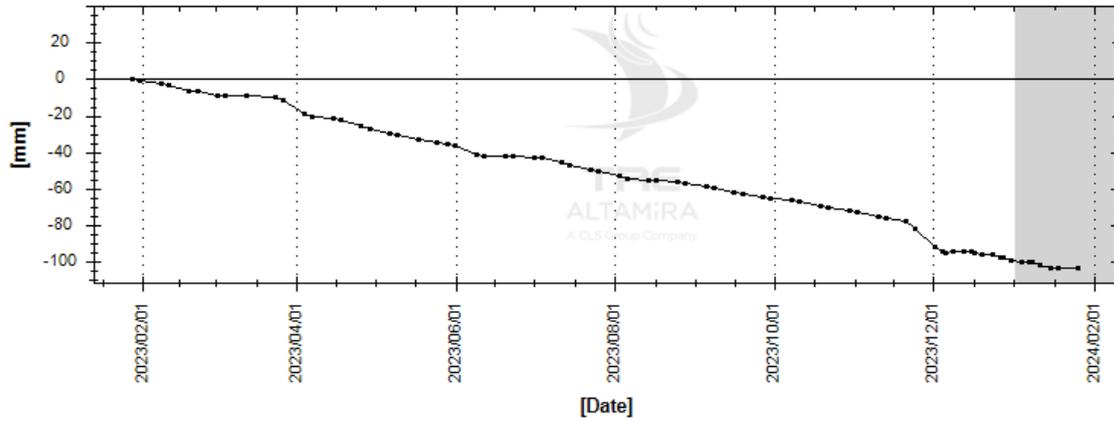
**TS11N - deformation rate: -77,97 - deformation rate standard deviation: 1,00  
cumulative displacement: -78,10**



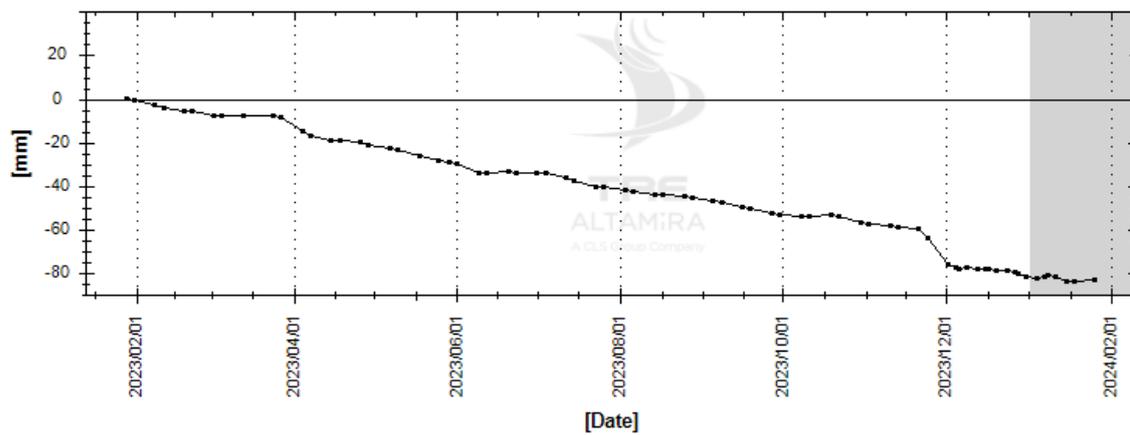
**TS12N - deformation rate: -116,67 - deformation rate standard deviation: 1,00  
cumulative displacement: -115,30**



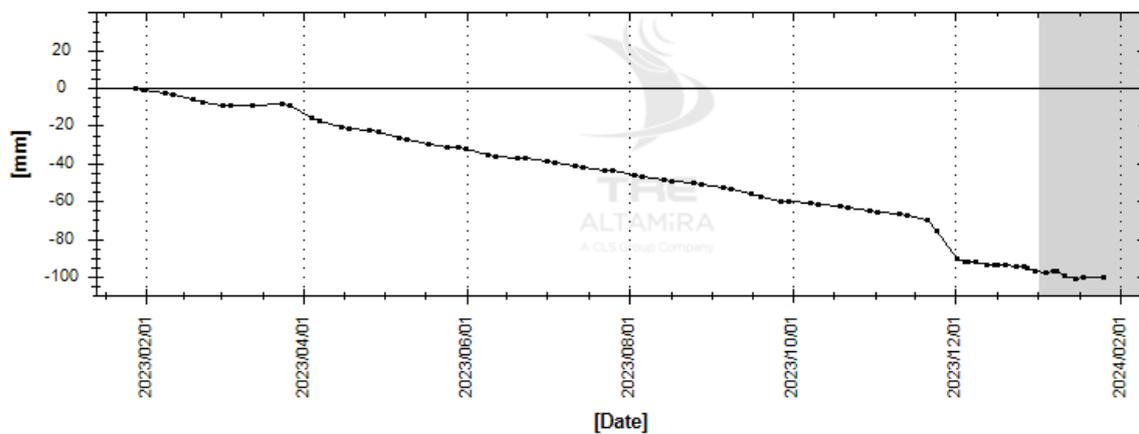
**TS13N - deformation rate: -105,76 - deformation rate standard deviation: 0,90  
cumulative displacement: -103,70**



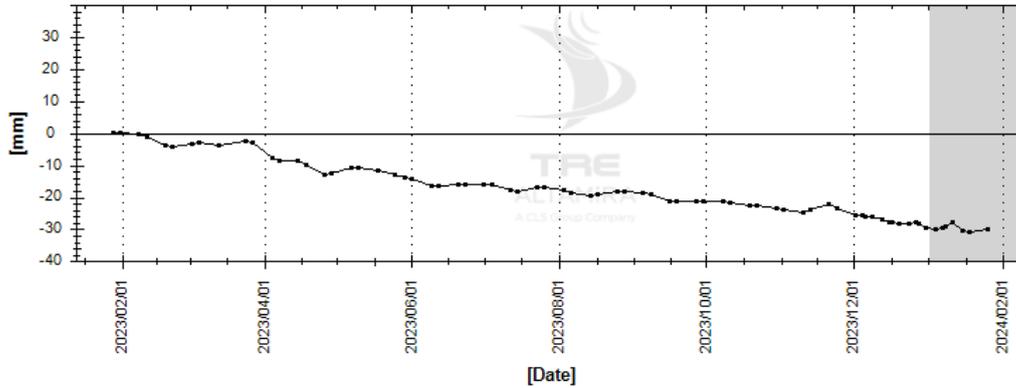
**TS14N - deformation rate: -85,23 - deformation rate standard deviation: 0,80  
cumulative displacement: -83,20**



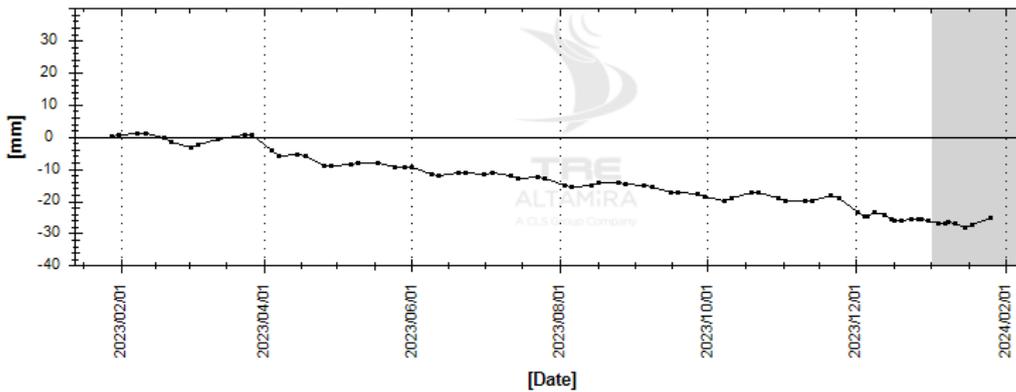
**TS15N - deformation rate: -102,77 - deformation rate standard deviation: 0,70  
cumulative displacement: -100,10**



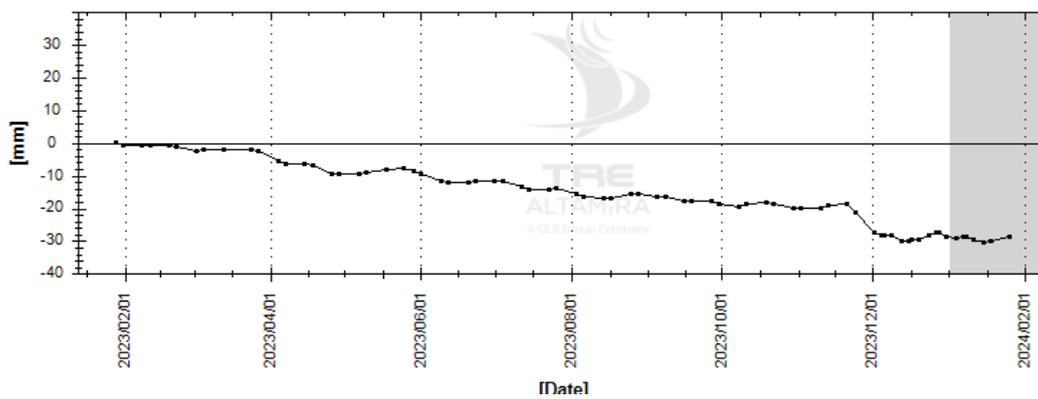
**TS16N - deformation rate: -28,69 - deformation rate standard deviation: 0,50  
cumulative displacement: -30,00**



**TS17N - deformation rate: -28,30 - deformation rate standard deviation: 0,40  
cumulative displacement: -25,40**



**TS18N - deformation rate: -30,67 - deformation rate standard deviation: 0,30  
cumulative displacement: -28,90**



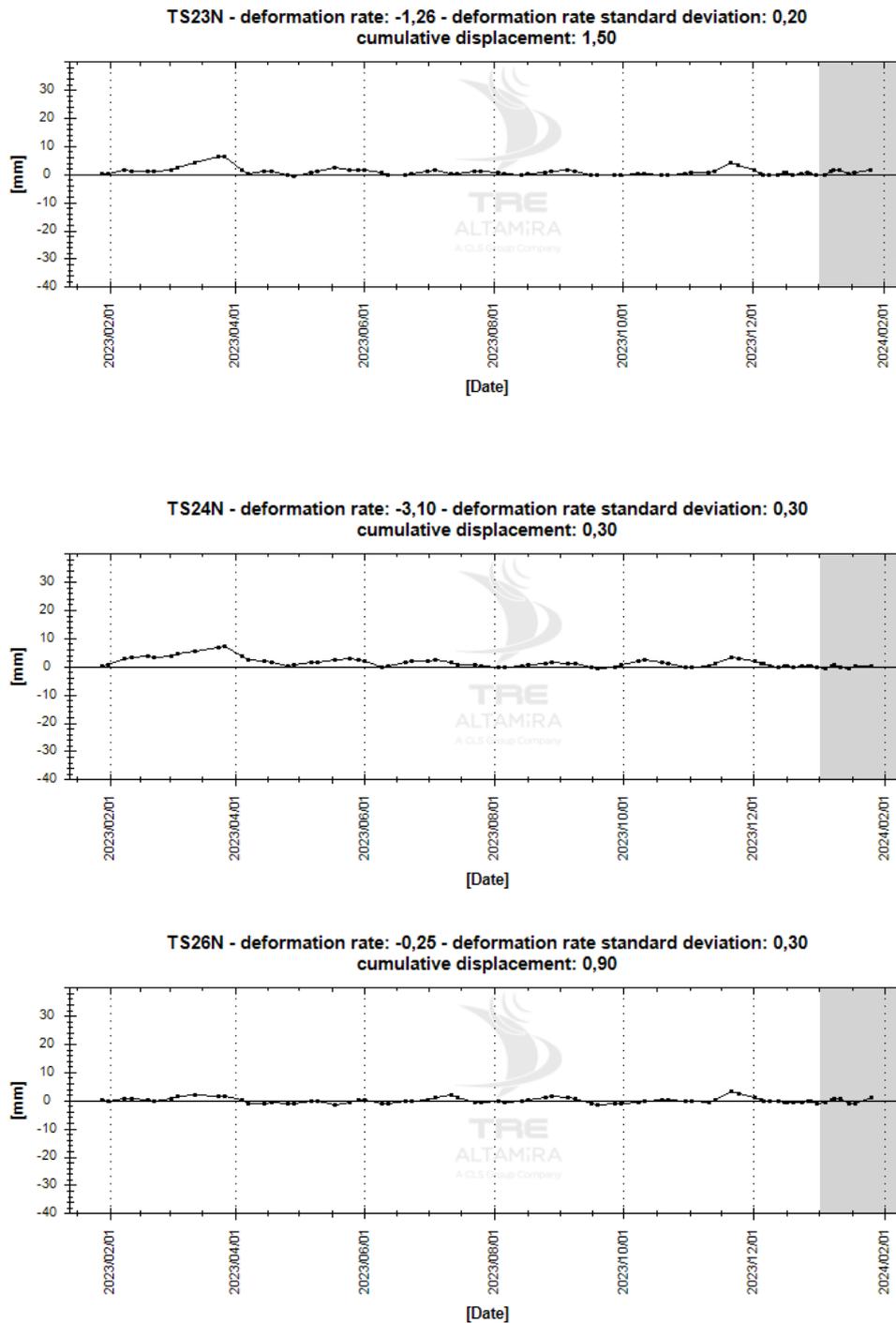


Figura 14: TS médias [VERT] dos polígonos de monitoramento (TS1N a TS26N) na área de Pinheiro-Mutange e imediações (Farol, Flexal)

---

### **2.2.1.2. Resultados - Geometria Horizontal**

A seguir, as Figura 15, Figura 16 e Figura 17 mostram, respectivamente, os mapas de deslocamento cumulativo anuais, trimestrais, e mensais para a componente leste-oeste na região de deslocamento em Pinheiro-Mutange.

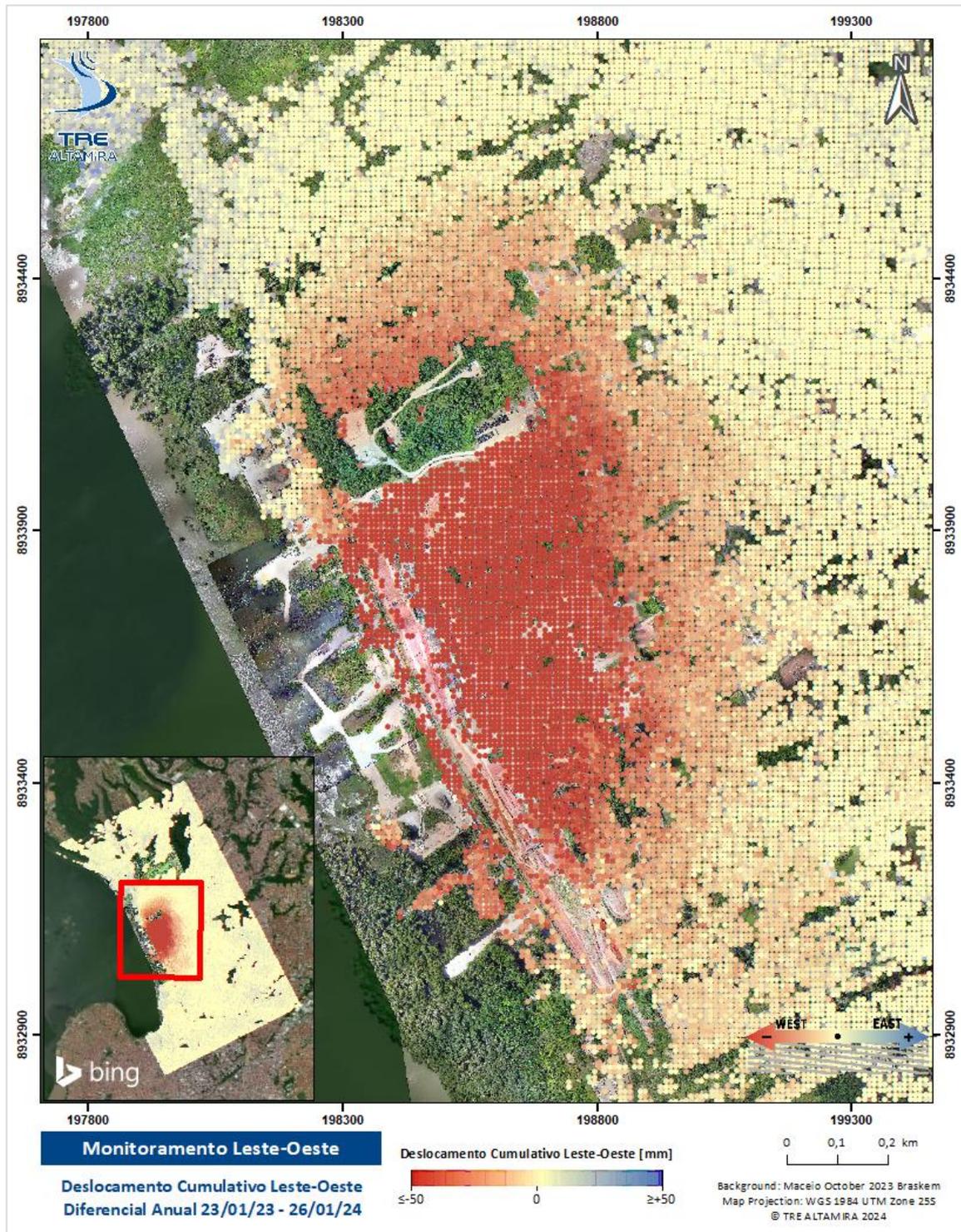


Figura 15: Mapa de deslocamento cumulativo anual [E-W] para a área de Pinheiro-Mutange; período de janeiro de 2023 a janeiro de 2024.

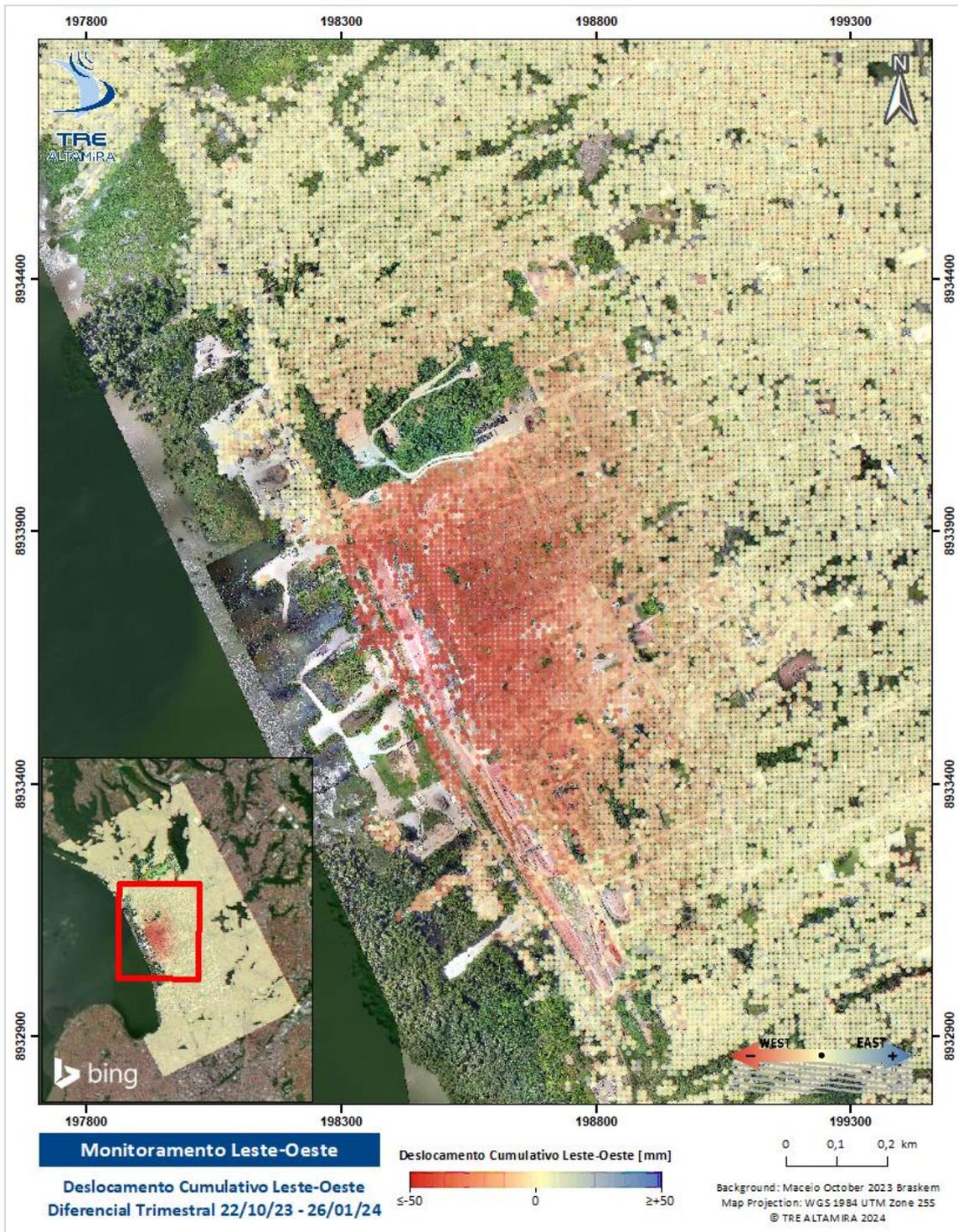


Figura 16: Mapa de deslocamento cumulativo trimestral [E-W] para a área de Pinheiro-Mutange; período de outubro de 2023 a janeiro de 2024.

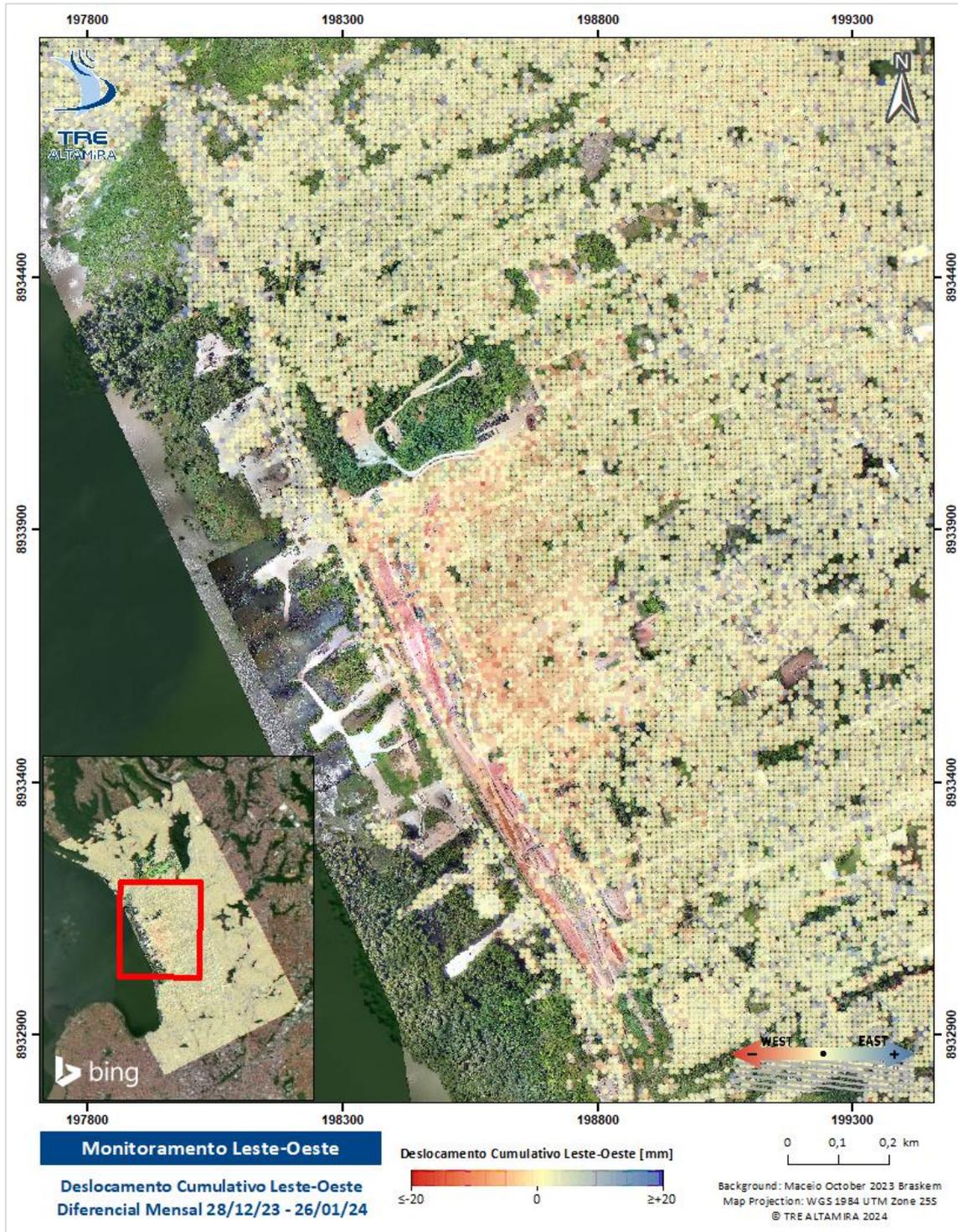


Figura 17: Mapa de deslocamento cumulativo mensal [E-W] para a área de Pinheiro-Mutange; período de dezembro de 2023 a janeiro de 2024.

Tal como na componente vertical, podemos observar que no período de um ano há um gradiente de deformação significativo na região, sendo que nos últimos três meses há uma concentração de deslocamento às margens da lagoa, sugerindo um máximo local de deformação neste período; para o mapa de deslocamento cumulativo diferencial mensal, a deformação mostra-se mais difusa, e de menor magnitude, o que sugere uma tendência de estabilização no movimento em direção a oeste presente na área.

A Figura 18 e Figura 19 mostram as seções transversais para a velocidade horizontal na área do foco de deslocamento em Pinheiro-Mutange. As seções têm, aproximadamente, orientações norte-sul e noroeste-sudeste respectivamente e comparam os períodos de estudo completo (junho de 2019 a janeiro de 2024), trimestral (outubro de 2023 a janeiro de 2024) e mensal (dezembro de 2023 a janeiro de 2024). A concentração de deslocamento horizontal se dá principalmente na porção central da zona de deformação, reduzindo-se mais conforme se distancia da margem da lagoa.

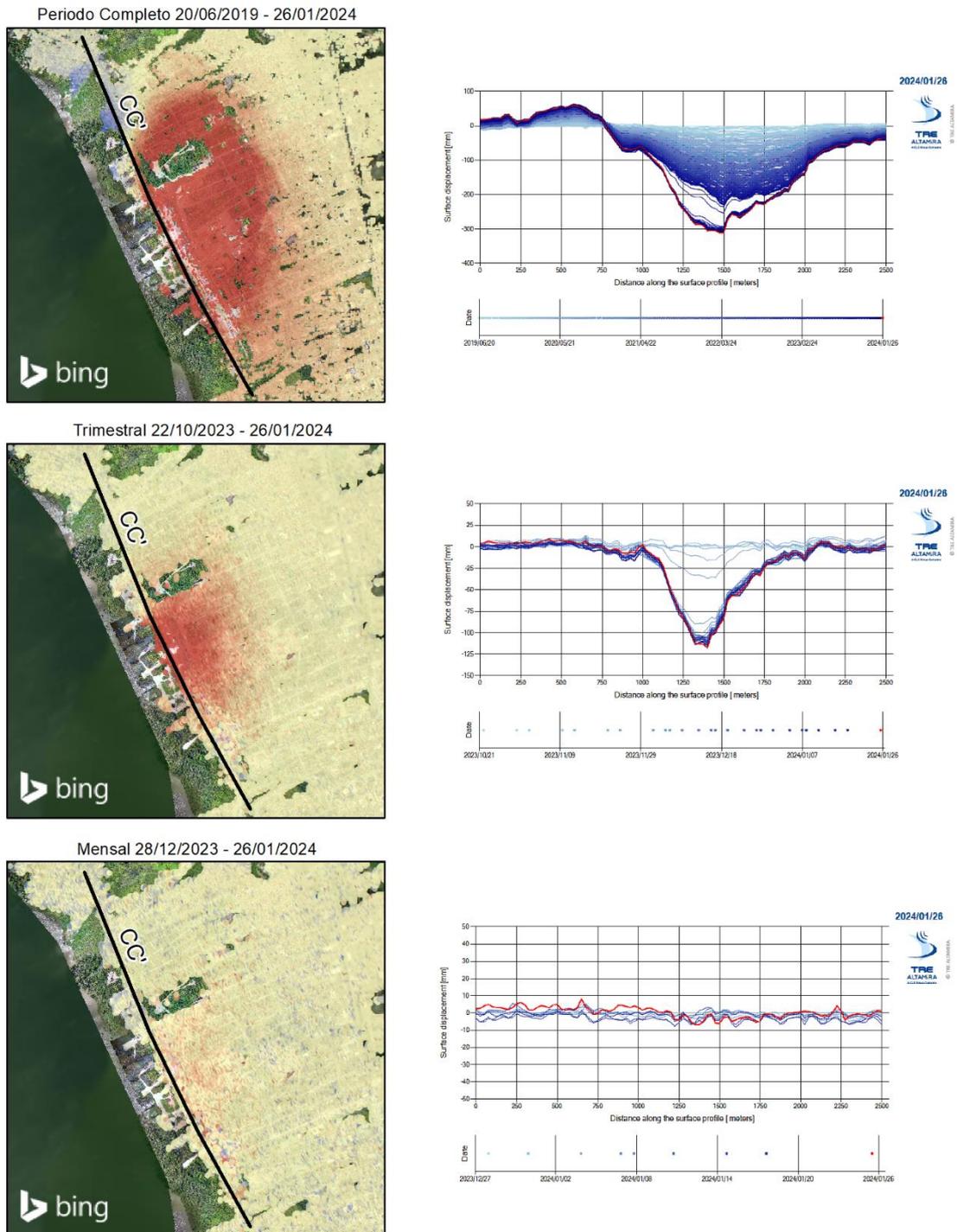


Figura 18: Seções transversais do deslocamento horizontal (períodos anual, trimestral e mensal) traçadas sobre o foco central de deformação, na direção norte-sul, em Pinheiro-Mutange, AOI Norte. As linhas mais escuras representam atualizações mais recentes

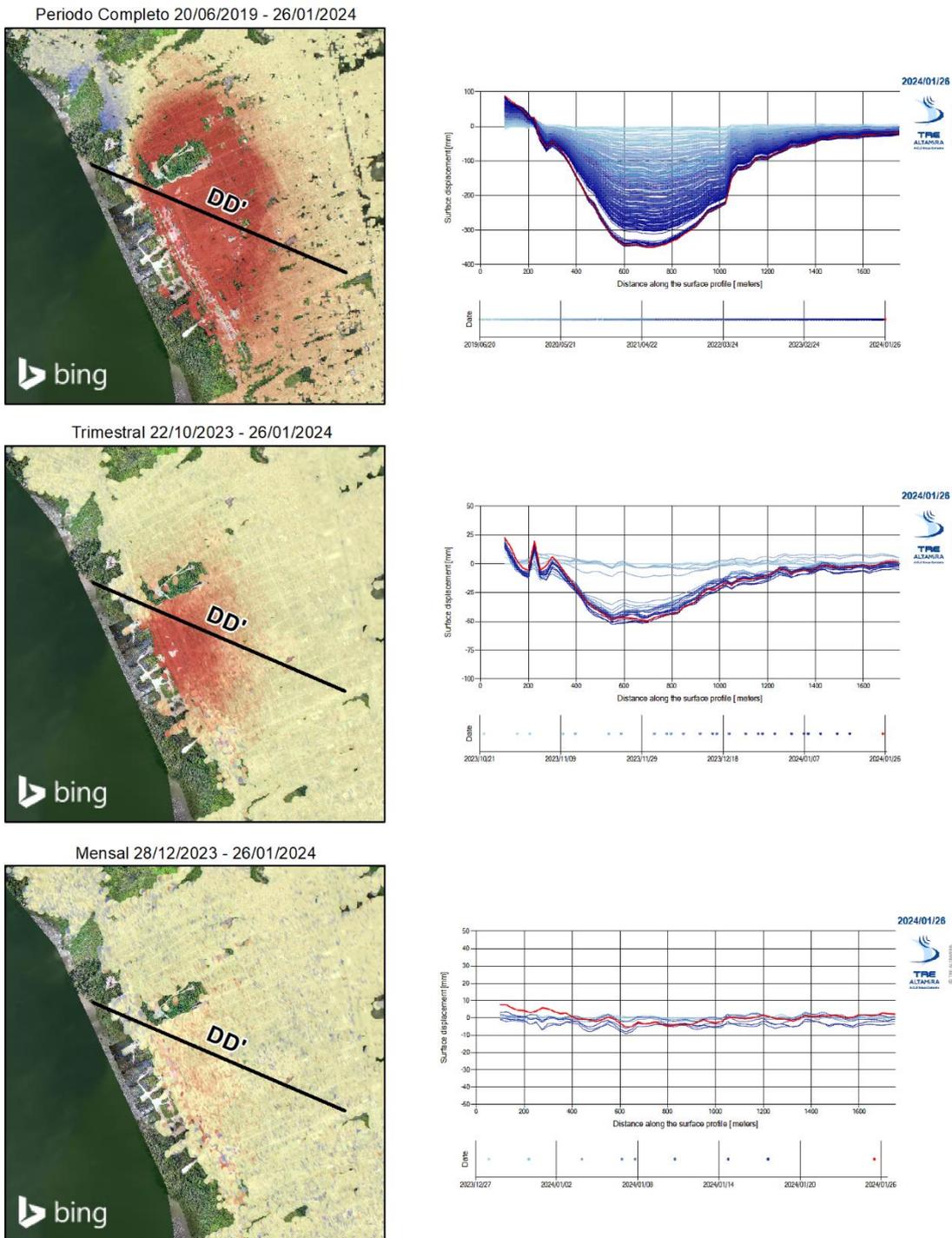


Figura 19: Seções transversais do deslocamento horizontal (períodos anual, trimestral e mensal) traçadas sobre o foco central de deformação, na direção noroeste-sudeste, em Pinheiro-Mutange, AOI Norte. As linhas mais escuras representam atualizações mais recentes

A seguir, na Figura 20, é apresentado o mapa de velocidade, usando o período de análise de janeiro de 2023 a janeiro de 2024, com os polígonos de monitoramento da região e suas respectivas séries temporais. A Figura 21 mostra as TSs médias dos polígonos de monitoramento da área, para o período de um ano. Neste período, os maiores valores horizontais registrados foram na TS6N, chegando a -142,30 mm de deslocamento cumulativo e -138,73 mm/ano de velocidade.

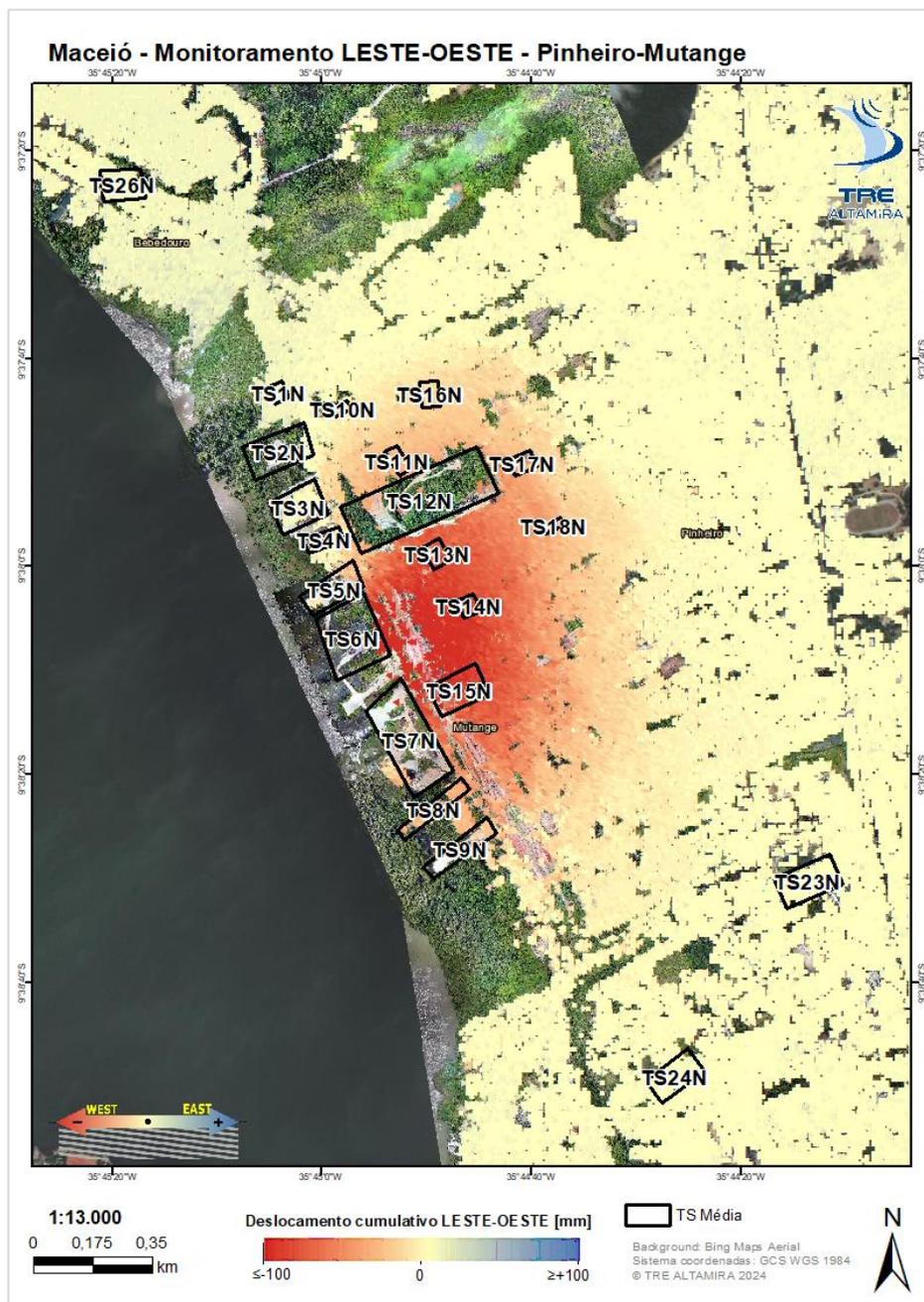
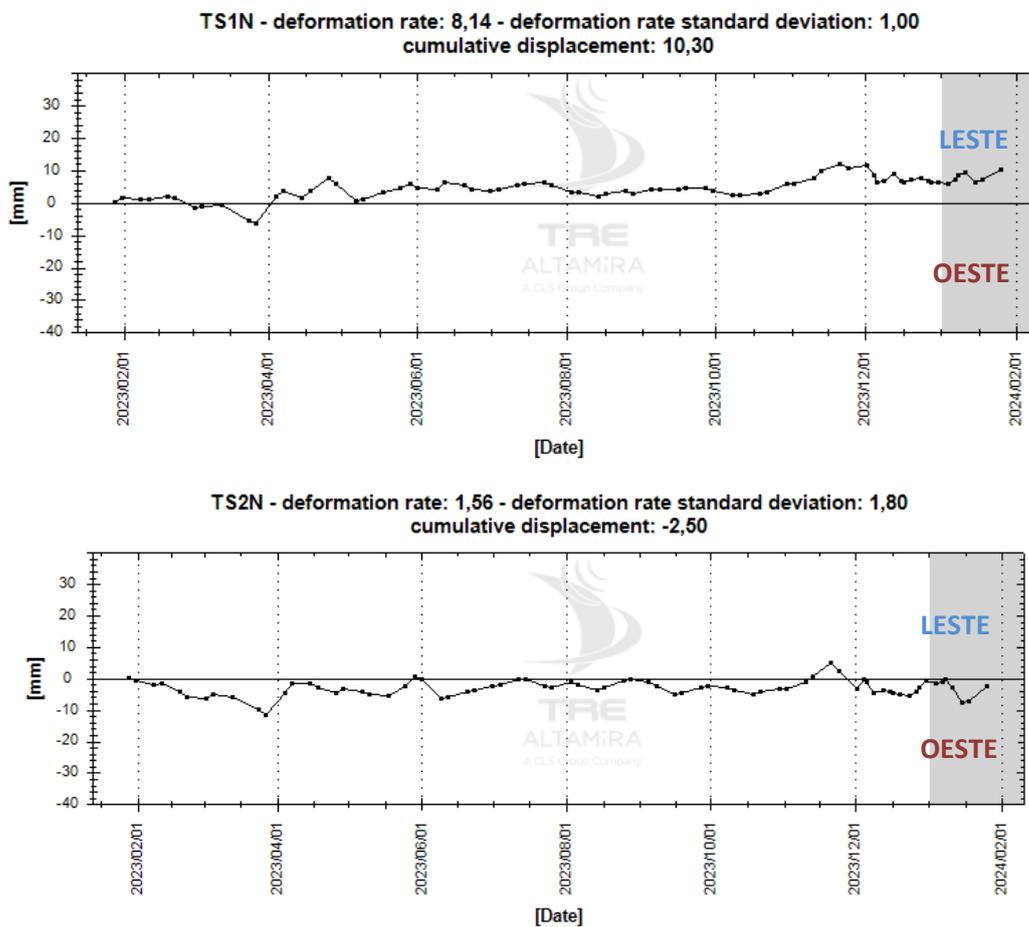


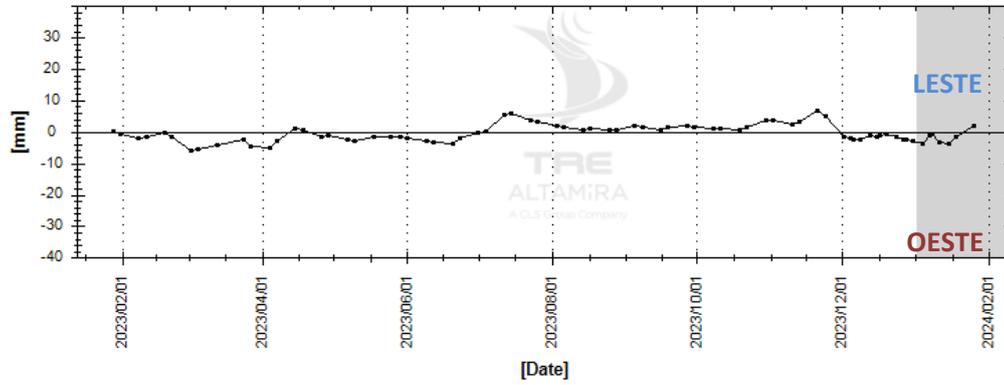
Figura 20: Detalhe de deslocamentos acumulados Leste-Oeste obtidos mediante a análise SqueeSAR® (janeiro de 2023 a janeiro de 2024) sobre Pinheiro e Mutange.

A despeito do pico de movimento presente em todos os polígonos em torno de novembro e dezembro de 2023, eles apresentam movimentação linear para os últimos meses estudados. Esta tendência continuará a ser observada nas atualizações seguintes.

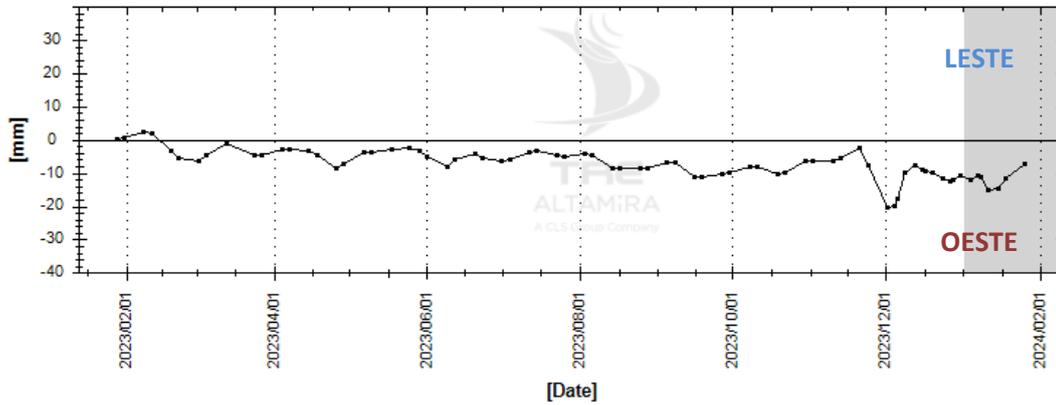
Os polígonos TS1N, TS23N, TS24N e TS26N apresentam tendência de movimentação a leste, porém com menor magnitude em comparação aos outros polígonos de monitoramento presentes na área.

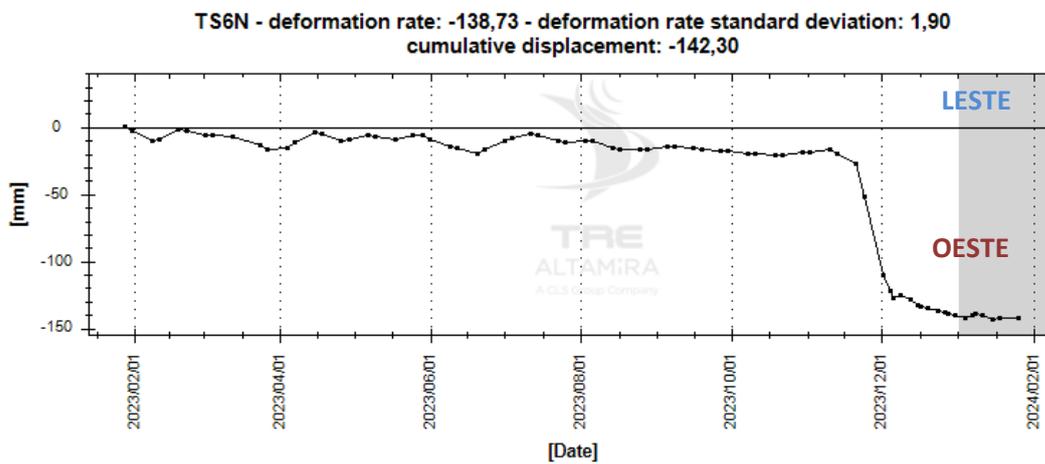
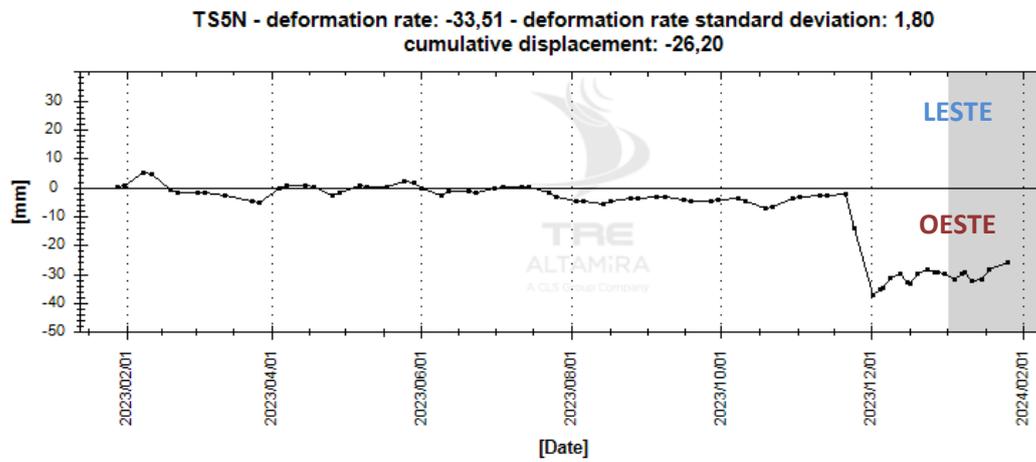


**TS3N - deformation rate: 2,12 - deformation rate standard deviation: 2,00  
cumulative displacement: 1,80**

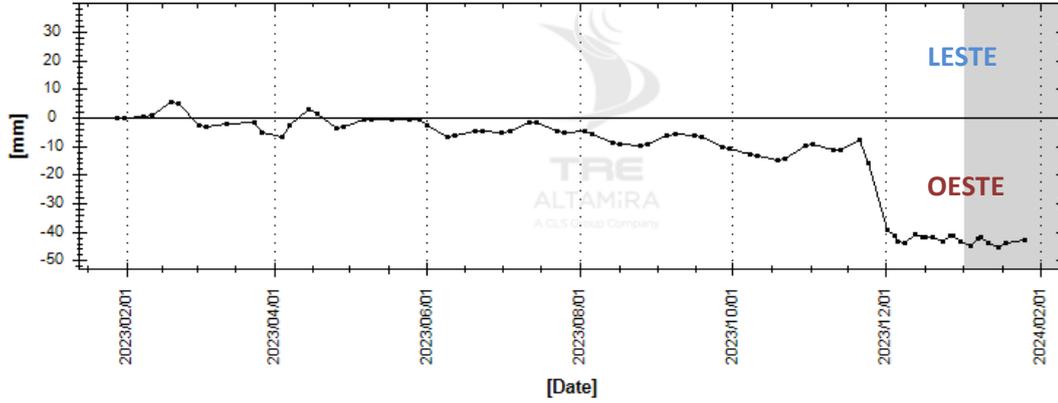


**TS4N - deformation rate: -11,01 - deformation rate standard deviation: 1,90  
cumulative displacement: -7,20**

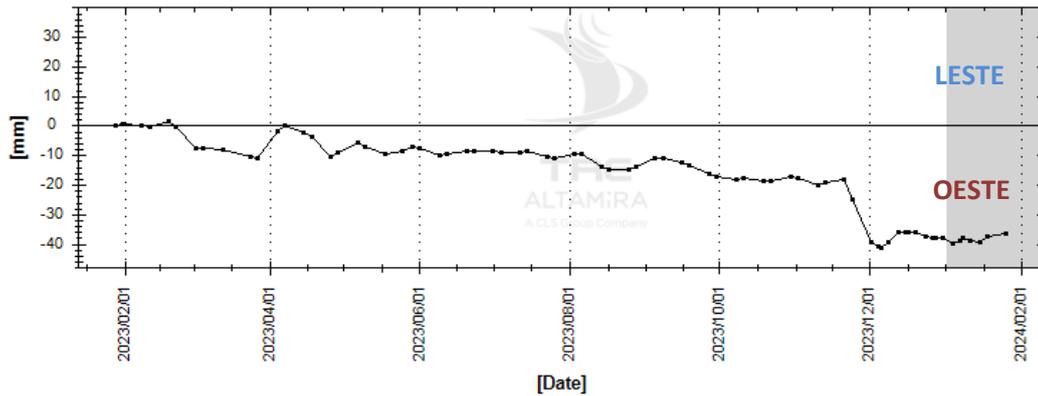




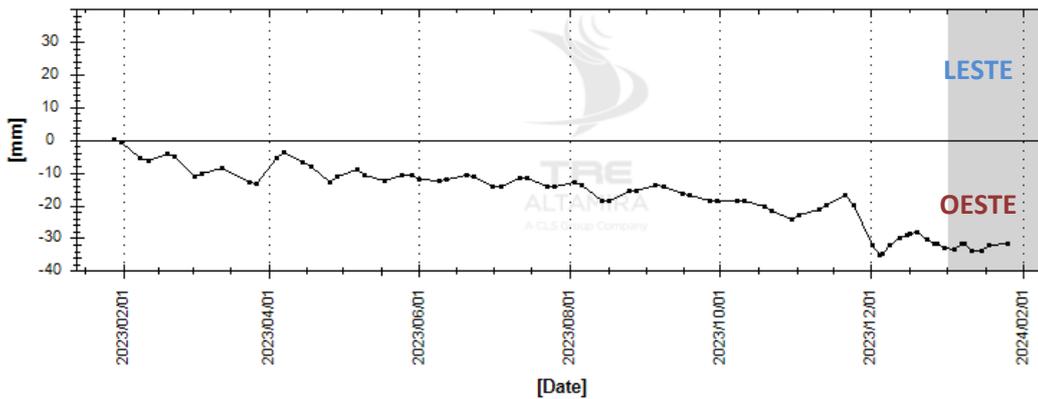
**TS7N - deformation rate: -47,15 - deformation rate standard deviation: 1,20  
cumulative displacement: -42,80**



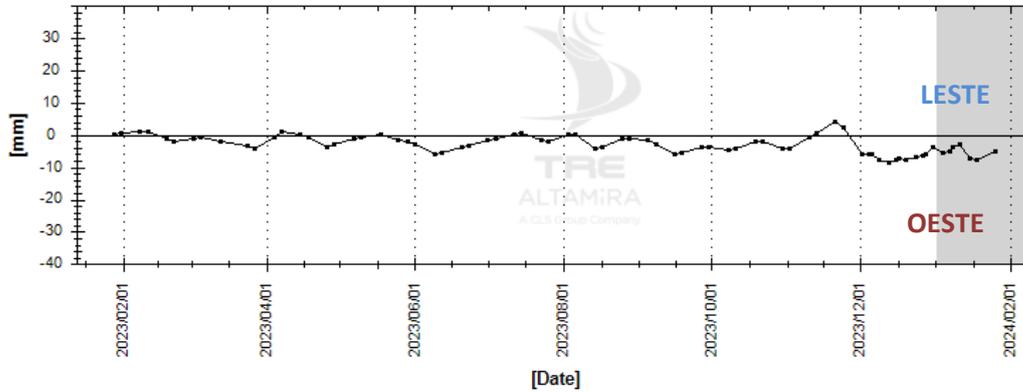
**TS8N - deformation rate: -40,03 - deformation rate standard deviation: 0,80  
cumulative displacement: -36,60**



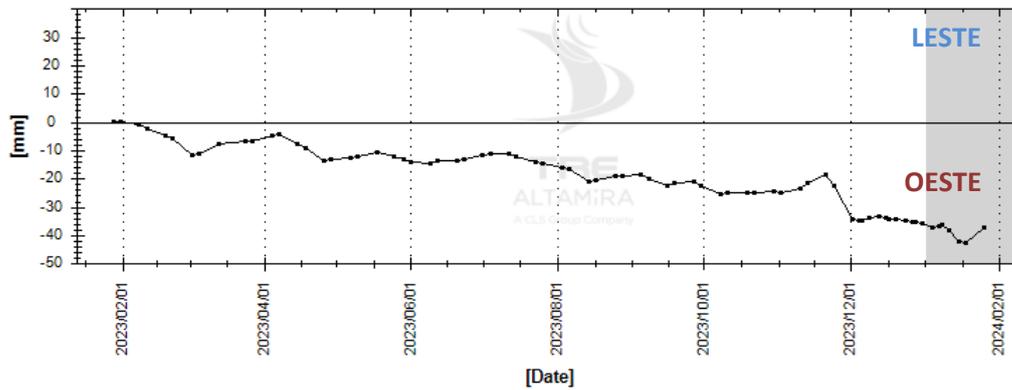
**TS9N - deformation rate: -29,25 - deformation rate standard deviation: 0,60  
cumulative displacement: -31,60**



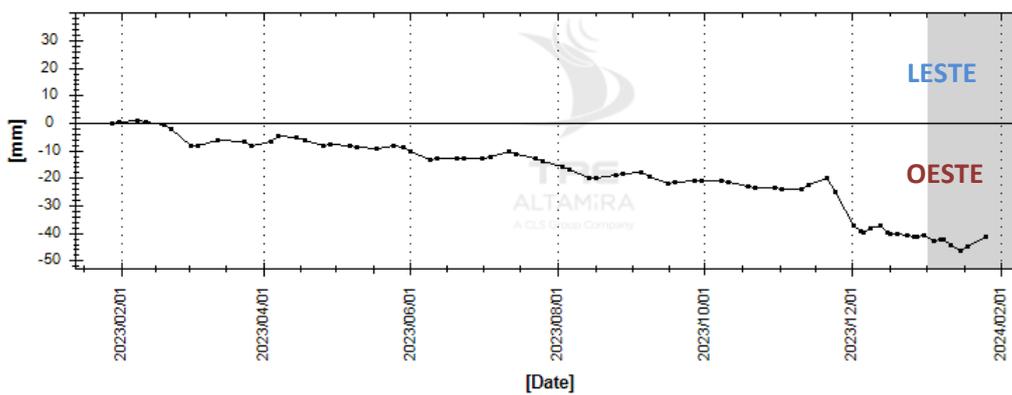
**TS10N - deformation rate: -5,22 - deformation rate standard deviation: 1,50  
cumulative displacement: -5,00**



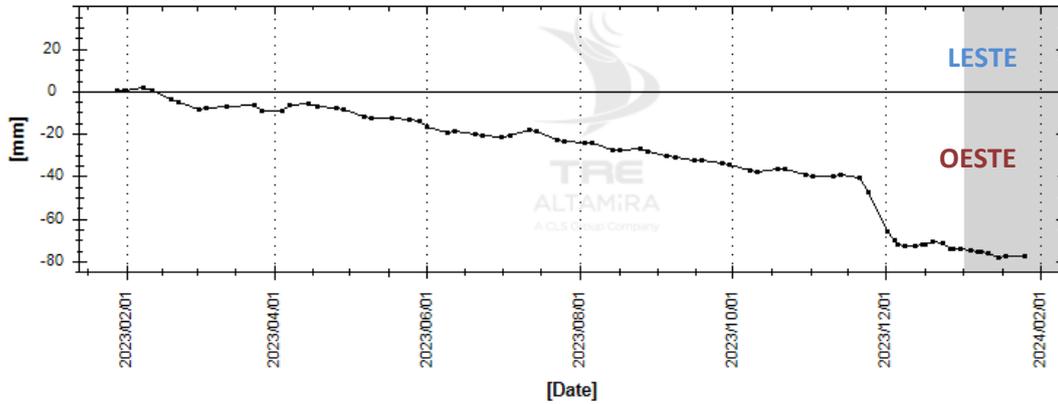
**TS11N - deformation rate: -35,82 - deformation rate standard deviation: 1,90  
cumulative displacement: -37,30**



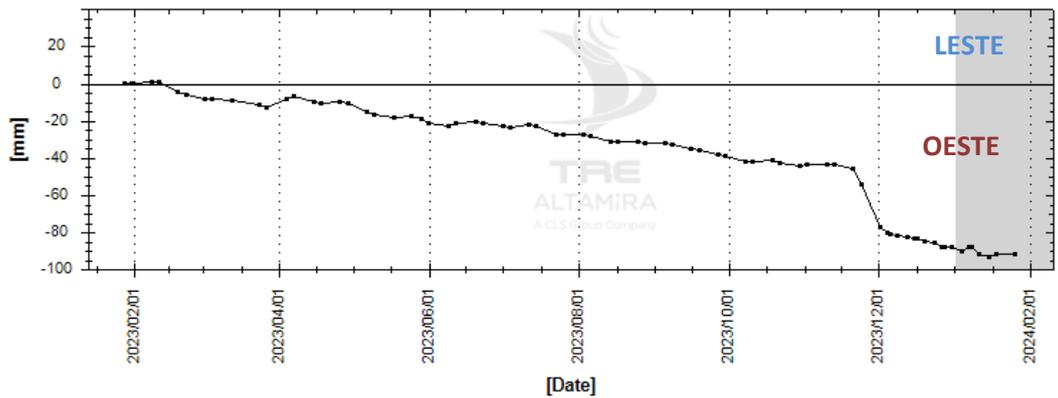
**TS12N - deformation rate: -43,68 - deformation rate standard deviation: 1,90  
cumulative displacement: -41,50**



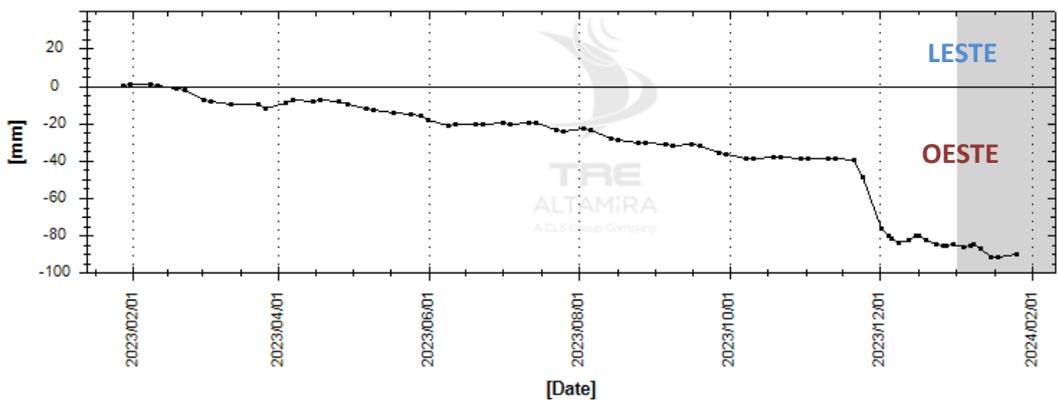
**TS13N - deformation rate: -80,91 - deformation rate standard deviation: 1,70  
cumulative displacement: -78,00**



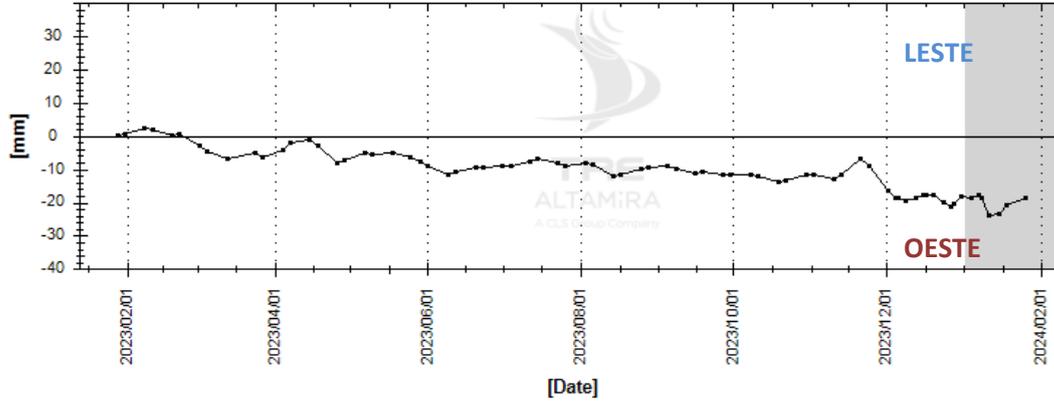
**TS14N - deformation rate: -93,39 - deformation rate standard deviation: 1,50  
cumulative displacement: -91,80**



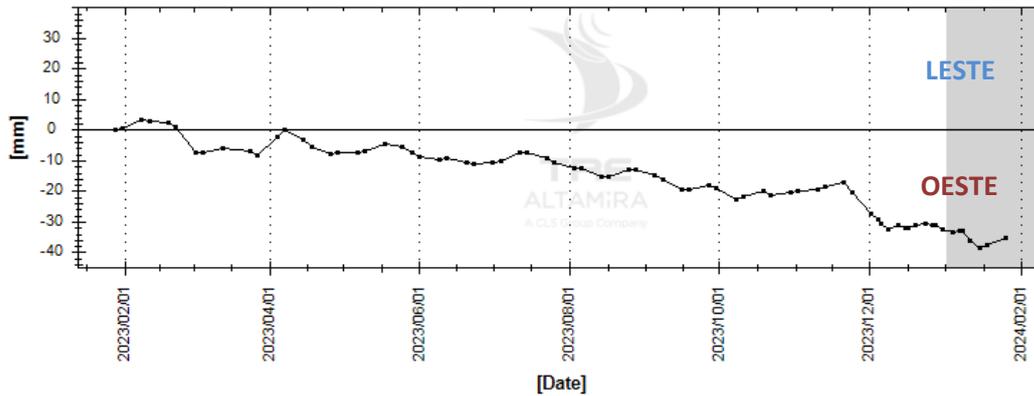
**TS15N - deformation rate: -91,78 - deformation rate standard deviation: 1,20  
cumulative displacement: -90,50**



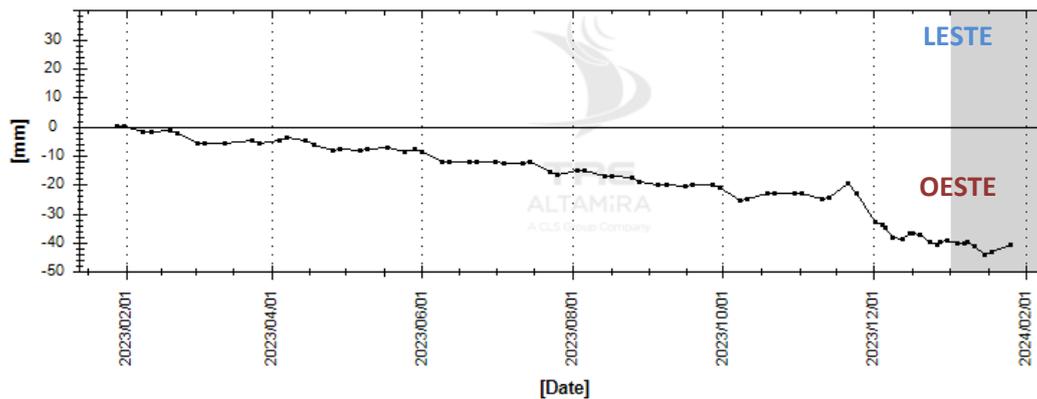
**TS16N - deformation rate: -19,38 - deformation rate standard deviation: 1,00  
cumulative displacement: -18,80**



**TS17N - deformation rate: -36,12 - deformation rate standard deviation: 0,70  
cumulative displacement: -35,40**



**TS18N - deformation rate: -41,99 - deformation rate standard deviation: 0,60  
cumulative displacement: -41,00**



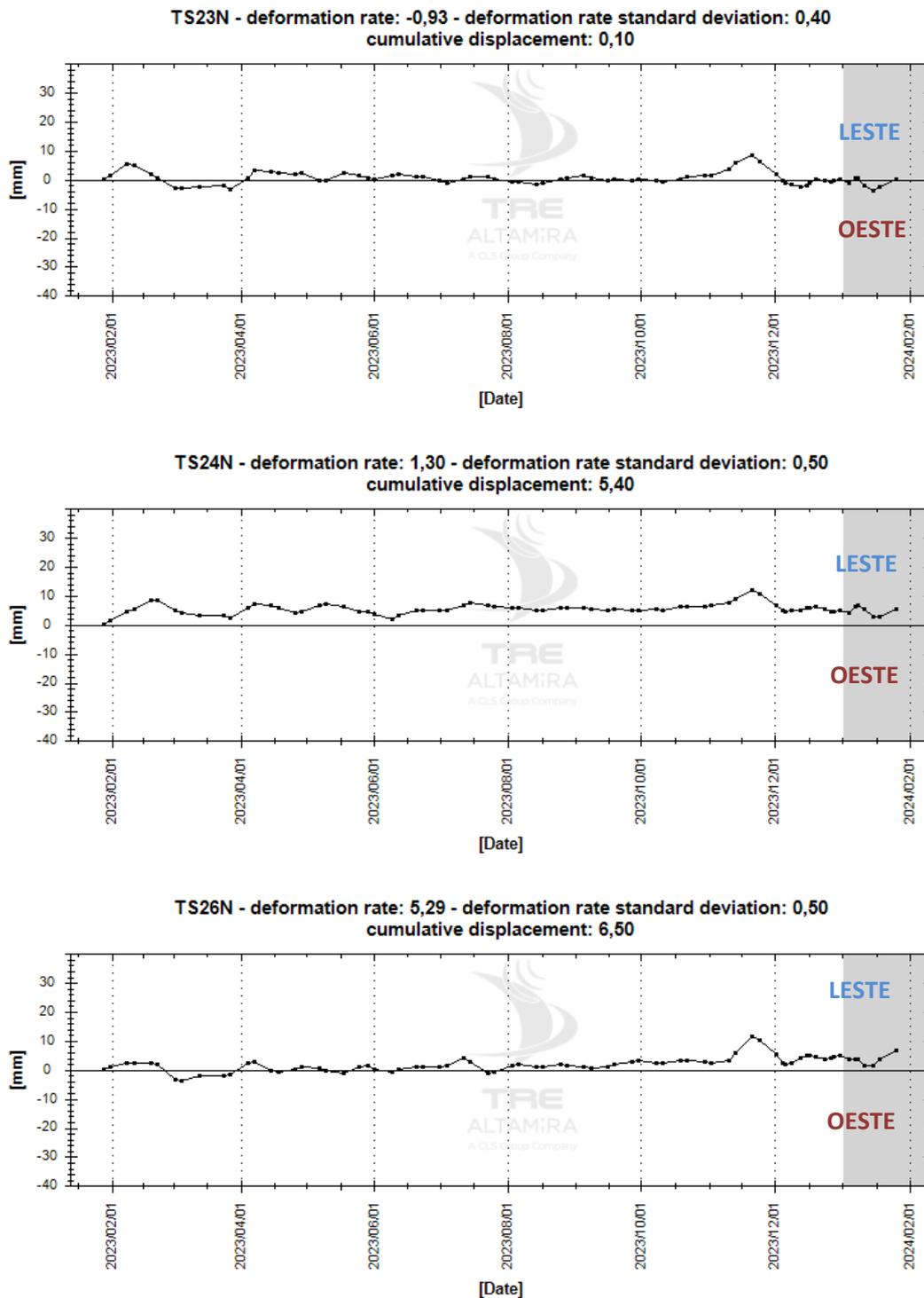


Figura 21: TSs médias [E-W] dos polígonos de monitoramento (TS1N a TS26N) na área de Pinheiro-Mutange e suas áreas nas imediações (Farol, Flexal).

## **2.2.2. Bom Parto – Levada**

Em geral, Bom Parto-Levada é uma área com baixa magnitude, sendo a componente vertical a única componente de velocidade notável. A seguir, serão apresentados os resultados para esta componente na região – sua velocidade cumulativa no período de um ano e as respectivas TSs médias dos polígonos de monitoramento da área.

### **2.2.2.1. Resultados – Geometria Vertical**

A Figura 22 mostra uma área de deslocamento nos bairros Bom Parto e Levada, no período de janeiro de 2023 a janeiro de 2024. O movimento observado na área destacada apresenta velocidade média de baixa magnitude, com tendência de estabilidade no último período de estudo, porém com algum nível de ruído na série temporal; este comportamento continuará sendo observado nas próximas atualizações.

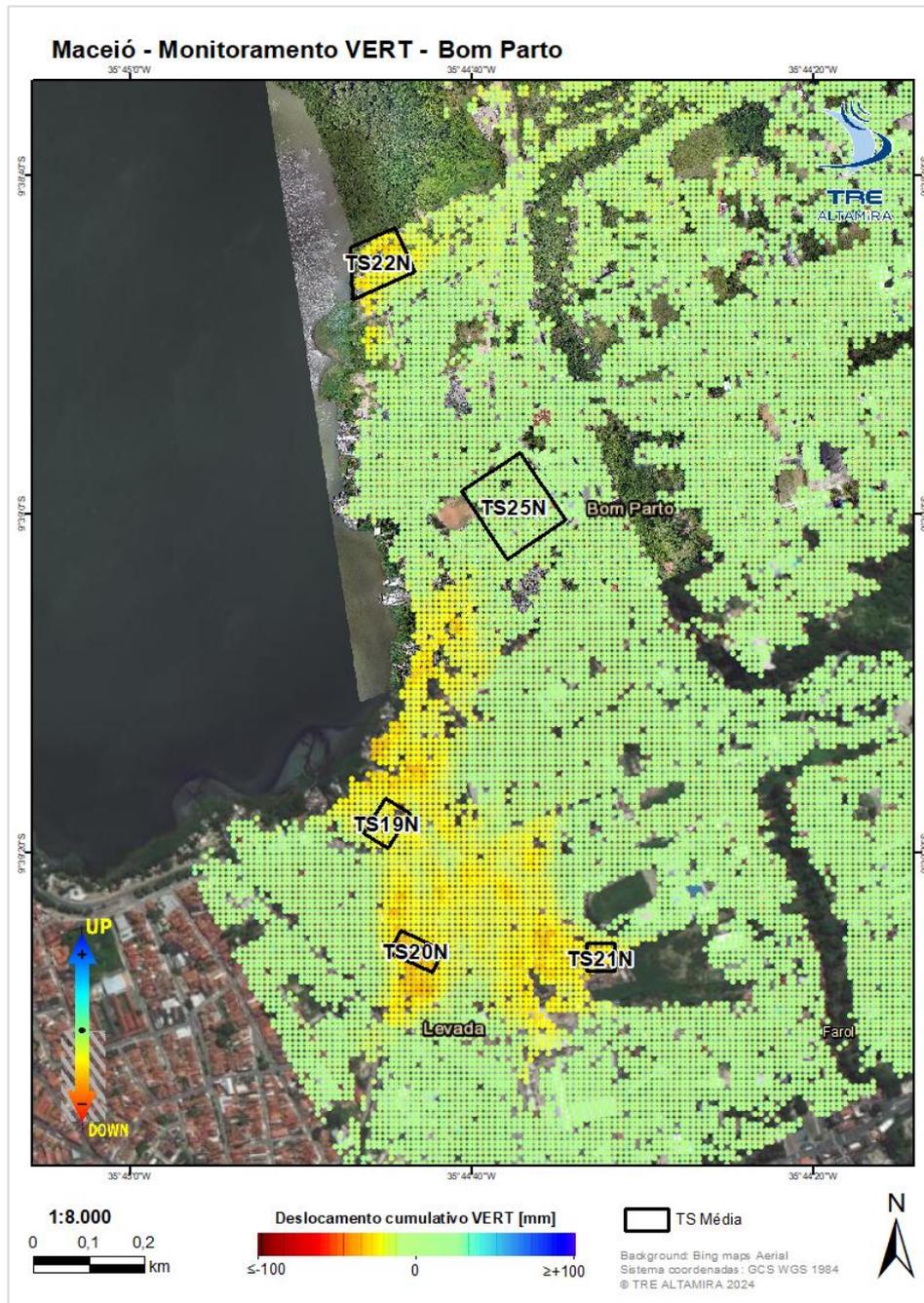
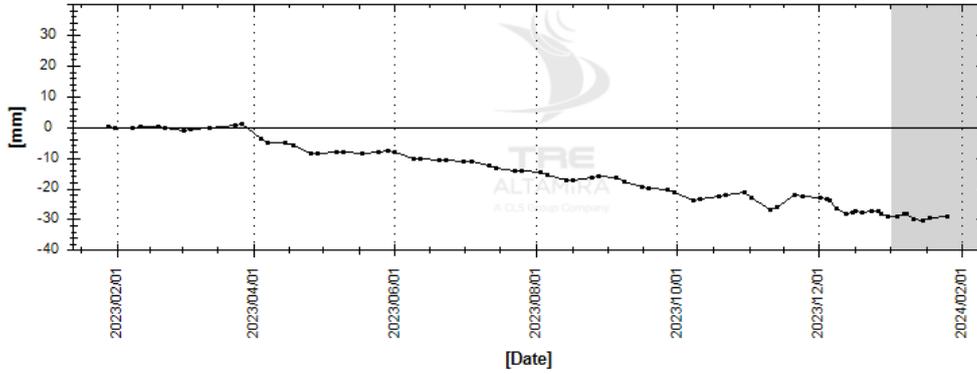


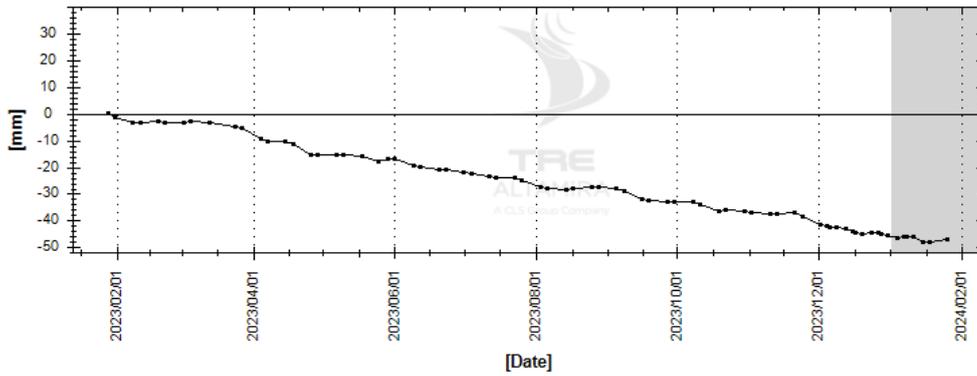
Figura 22: Taxa de deslocamento anual [VERT] SqueeSAR® sobre Bom Parto e Levada.

A Figura 23 mostra a evolução das TS médias sobre os bairros Bom Parto e Levada. O maior deslocamento médio apresentado foi na TS20N, apresentando deslocamento cumulativo de -47,20 mm e velocidade média anual de -48,40 mm/ano. As séries temporais dos polígonos TS23N e TS25N apresentam estabilidade no movimento e baixíssima magnitude no período analisado.

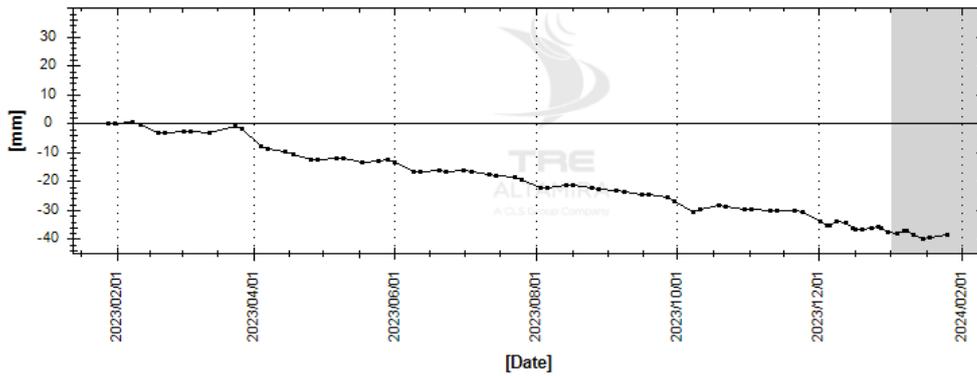
**TS19N - deformation rate: -32,55 - deformation rate standard deviation: 0,30  
cumulative displacement: -29,10**



**TS20N - deformation rate: -48,40 - deformation rate standard deviation: 0,30  
cumulative displacement: -47,20**



**TS21N - deformation rate: -40,25 - deformation rate standard deviation: 0,30  
cumulative displacement: -38,70**



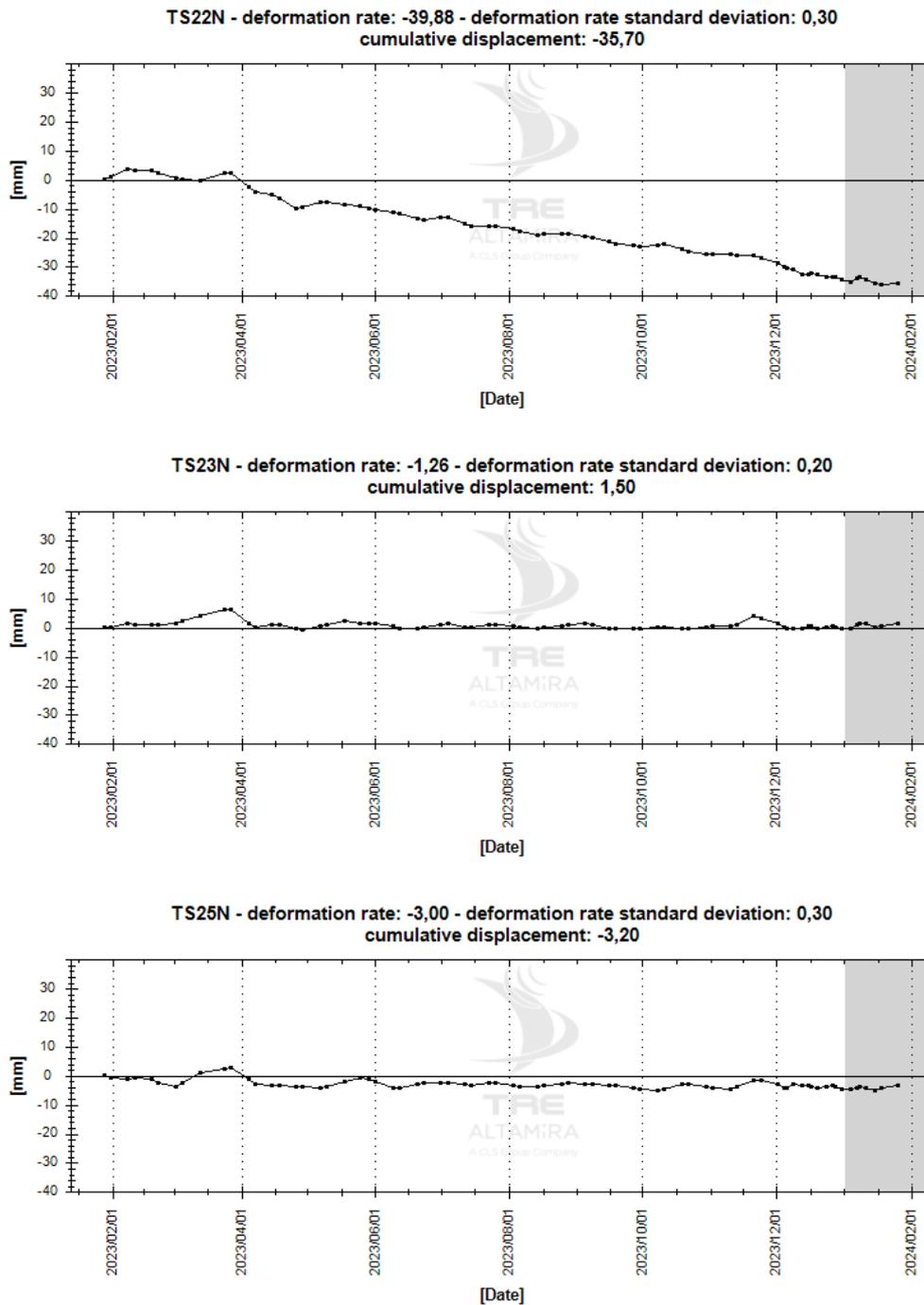


Figura 23: TSs Médias [VERT] sobre Bom Parto e Levada.

### 3. Conclusões

A atualização 2D SqueeSAR® de janeiro de 2024 foi realizada com 152 imagens do satélite TerraSAR-X em geometria ascendente e 156 imagens em geometria descendente, cobrindo o período de junho de 2019 a janeiro de 2024. Do mesmo modo, nos pontos coincidentes de ambas as geometrias LOS, foi obtida a decomposição 2D vetorial do movimento Vertical e Horizontal Leste-Oeste.

O número de MPs foi muito elevado, exceto nas áreas com vegetação densa. O estudo mostra um fenômeno de deslocamento importante afetando os bairros Mutange, Bebedouro, Pinheiro e Bom Parto, com um incremento progressivo na magnitude dos deslocamentos em direção à margem da lagoa Mundaú. Abaixo seguem os pontos principais:

- O número de MP (pontos de medição) identificados na AOI Norte é muito alto, conferindo uma densa cobertura da área, graças às características urbanas da área;

Satélite	Geometria	Entrega	# imagens	# de MP	MP / km <sup>2</sup>
TSX	Asc	Janeiro de 2024	152	923.119	59.611
TSX	Desc	Janeiro de 2024	156	870.258	56.197
TSX	VERT / E-W	Janeiro de 2024	306	98.062	6.332

- Em algumas áreas, não foi possível encontrar MP, possivelmente devido à presença de vegetação, áreas agrícolas ou áreas com dinâmica no terreno (obras, escavações, deposições, terraplanagens etc.) que ocasionam mudança na refletividade da superfície;
- Nesta atualização, não houve nenhuma falha de aquisição de imagens, todas foram adquiridas pelo satélite conforme programação; também não foi registrado nenhum efeito atmosférico anômalo que pudesse causar alguma mudança de comportamento nos resultados gerados;
- O estudo revela deslocamentos importantes nos bairros Mutange, Bebedouro, Pinheiro e Bom Parto; o deslocamento vertical mais intenso foi observado na região das margens da lagoa, incluindo a área onde a Braskem operava; os mapas de deslocamento cumulativo diferenciais sugerem uma tendência de estabilização do movimento em ambas as componentes (vertical, horizontal) no último mês, esta tendência será observada nas atualizações subsequentes;
- Na área de Pinheiro-Mutange, para o período que se estende de janeiro de 2023 a janeiro de 2024, o polígono que apresentou maior média de velocidade vertical foi o polígono TS6N, com -205,80 mm de deslocamento cumulativo e velocidade de -205,60 mm/ano;

- Também na área de Pinheiro-Mutange, o mesmo polígono, TS6N, apresentou a maior média de velocidade horizontal, chegando a -142,30 mm de deslocamento cumulativo e velocidade de -138,73 mm/ano;
- Pinheiro-Mutange, após período de mudança de velocidade entre novembro e dezembro de 2023, apresenta tendência de estabilização da movimentação para as duas componentes. Esta tendência será monitorada e verificada em cada atualização subsequente;
- Em Bom Parto-Levada, a maior média de velocidade vertical registrada na TS20N, apresentando deslocamento cumulativo de -47,20 mm e velocidade média anual de -48,40 mm/ano. A área como um todo apresenta movimentação de magnitude muito baixa;

O projeto continuará com as atualizações mensais das medidas de deslocamentos nas geometrias ascendente, descendente e 2D (Vertical e Leste-Oeste), com precisão estável, considerando que o conjunto de dados processado atingiu robustez capaz de garantir um desvio padrão das medidas < 1 mm/ano. As análises continuarão focadas nas mudanças das tendências das TSs com a finalidade de acompanhar a continuidade ou não da desaceleração dos movimentos observada nos últimos meses do estudo.

## Apêndice A – Dados Entregues

Os dados SqueeSAR® foram entregues em formato shapefile, no sistema de coordenadas geográficas WGS84. Podem ser carregados e visualizados em qualquer sistema de informação geográfica (GIS).

O shapefile das análises ascendente, descendente e geometria vertical e horizontal Leste-Oeste, contém detalhes dos pontos identificados, incluindo relação de deslocamento, elevação, séries temporais de deslocamento e índices de qualidade (coerência e desvio padrão). A informação associada aos arquivos do banco de dados (dbf) está descrita no Quadro 1 (*single geometry data*) e no Quadro 2 (geometria dupla 2D Vertical e Horizontal Leste-Oeste).

Um arquivo de metadado (.xml) e o relatório do processamento estão associados a cada shapefile e contém especificações técnicas do processamento das análises feitas. A lista completa dos dados entregues encontra-se no Quadro 3.

Todos os resultados SqueeSAR® foram carregados no portal online TREmaps®. O acesso aos dados é através de um usuário e senha seguros (somente usuários autorizados podem ter acesso aos resultados SqueeSAR®).

Quadro 1: Descrição dos valores na base de dados para a geometria ascendente e descendente

Campo	Descrição
CODE	Código de identificação do MP
HEIGHT	Elevação Topográfica [m] referidos em WGS84 elipsoide
H_STDEV	Desvio padrão da Altitude [m]
VEL	Relação de deslocamento do MP. Valores positivos representam deslocamentos de aproximação ao <i>satélite</i> ; valores negativos correspondem a deslocamentos de afastamento do <i>satélite</i> [mm/ano]
V_STDEV	Desvio padrão dos deslocamentos [mm/ano]
ACC	Aceleração [mm/ano <sup>2</sup> ]
A_STDEV	Desvio padrão da aceleração [mm/ano <sup>2</sup> ]
COHERENCE	Índice que varia entre 0 e 1, relacionado com a fase do MP ( <i>phase noise</i> ) e a capacidade de adaptação ao modelo adotado para lidar com o comportamento do MP.

<b>STD_DEF</b>	O valor da barra de erro para cada MP [mm]; representa o desvio padrão das medidas com relação ao modelo analítico de deformação.
<b>EFF_AREA</b>	Representa a extensão efetiva da área [m <sup>2</sup> ] coberta pelos <i>Distributed Scatterers</i> (DS). Para os <i>Permanent Scatterers</i> (PS), o valor é 0.
<b>Dyyyymmdd</b>	Colunas que contém os valores de deslocamento das sucessivas imagens relativas a primeira imagem disponível. Os valores estão representados em [mm]

Quadro 2: Descrição dos valores na base de dados para a geometria vertical e horizontal.

Campo	Descrição
<b>CODE</b>	Código de identificação do MP
<b>VEL_V</b>	Relação de deslocamento vertical do MP. Valores positivos representam deslocamentos de elevação; valores negativos correspondem a deslocamentos de subsidência ou afundamento [mm/ano]
<b>VEL_E</b>	Relação de deslocamento horizontal do MP. Valores positivos representam deslocamentos na direção Leste; valores negativos correspondem a deslocamentos na direção Oeste [mm/ano]
<b>V_STDEV_{V/E}</b>	Desvio padrão dos deslocamentos em Vertical ou Leste-Oeste [mm/ano]
<b>Dyyyymmdd</b>	Colunas que contém os valores de deslocamento das sucessivas imagens relativas a primeira imagem disponível. Os valores estão representados em [mm]

Quadro 3: Dados entregues.

Análise	Nome do arquivo
<b>TSX Ascendente</b>	MACEIO_TSX_T11_A_JAN2024_ES7798A042S.shp
	MACEIO_TSX_T11_A_JAN2024_ES7798A042S.dbf
	MACEIO_TSX_T11_A_JAN2024_ES7798A042S.shx
	MACEIO_TSX_T11_A_JAN2024_ES7798A042S.prj
	MACEIO_TSX_T11_A_JAN2024_ES7798A042S.xml
	MACEIO_TSX_T11_A_JAN2024_ES7798A042S_45.kmz
	MACEIO_TSX_T11_A_JAN2024_ES7798A042S_50.kmz

Análise	Nome do arquivo
	MACEIO_TSX_T11_A_JAN2024_ES7798A042S.pdf
	MACEIO_TSX_T125_D_JAN2024_ES7798A043S.shp
	MACEIO_TSX_T125_D_JAN2024_ES7798A043S.dbf
	MACEIO_TSX_T125_D_JAN2024_ES7798A043S.shx
<b>TSX Descendente</b>	MACEIO_TSX_T125_D_JAN2024_ES7798A043S.prj
	MACEIO_TSX_T125_D_JAN2024_ES7798A043S.xml
	MACEIO_TSX_T125_D_JAN2024_ES7798A043S_65.kmz
	MACEIO_TSX_T125_D_JAN2024_ES7798A043S.pdf
	MACEIO_TSX_VERT_JAN2024_ES7798A048V.shp
	MACEIO_TSX_VERT_JAN2024_ES7798A048V.dbf
<b>TSX Vertical</b>	MACEIO_TSX_VERT_JAN2024_ES7798A048V.shx
	MACEIO_TSX_VERT_JAN2024_ES7798A048V.prj
	MACEIO_TSX_VERT_JAN2024_ES7798A048V.xml
	MACEIO_TSX_VERT_JAN2024_ES7798A048V_70.kmz
	MACEIO_TSX_EAST_JAN2024_ES7798A049E.shp
	MACEIO_TSX_EAST_JAN2024_ES7798A049E.dbf
<b>TSX Horizontal Leste-Oeste</b>	MACEIO_TSX_EAST_JAN2024_ES7798A049E.shx
	MACEIO_TSX_EAST_JAN2024_ES7798A049E.prj
	MACEIO_TSX_EAST_JAN2024_ES7798A049E.xml
	MACEIO_TSX_EAST_JAN2024_ES7798A049E_35.kmz
<b>Relatório técnico</b>	Relatório_técnico_PO23-2216-ES_Maceio-N_Atualização2D_Jan2024.pdf

## Apêndice B – Descrições de Legendas

Escala de cores dos deslocamentos cumulativos Vertical e Leste-Oeste em LOS, respectivamente.

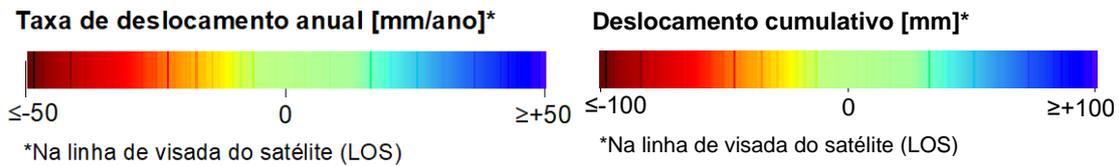


Ilustração 1: Escala de cor utilizada para simbolizar o deslocamento anual e acumulado em LOS.

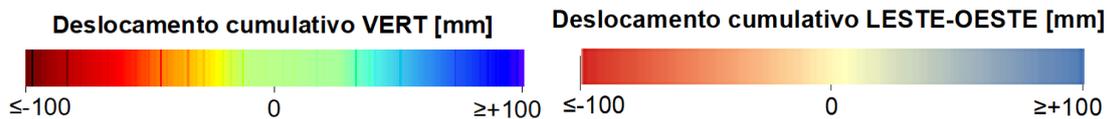


Ilustração 2: Escala de cor utilizada para simbolizar o deslocamento anual e acumulado em vertical e Leste-Oeste, respectivamente.

A Ilustração 3 mostra o significado da aceleração dependendo do sinal do movimento e o sinal da própria aceleração. Para um deslocamento positivo, uma aceleração positiva implica em um incremento da taxa de deslocamento, enquanto uma aceleração negativa é uma diminuição da taxa de deslocamento. Para um valor negativo de deslocamento, uma aceleração positiva significa uma diminuição da taxa do deslocamento, enquanto um valor negativo implica em um incremento da taxa de deslocamento. Valores igual a 0 resultam em um padrão linear de deslocamento. A Ilustração 4 mostra a escala de cores variação para ilustrar os valores de aceleração.

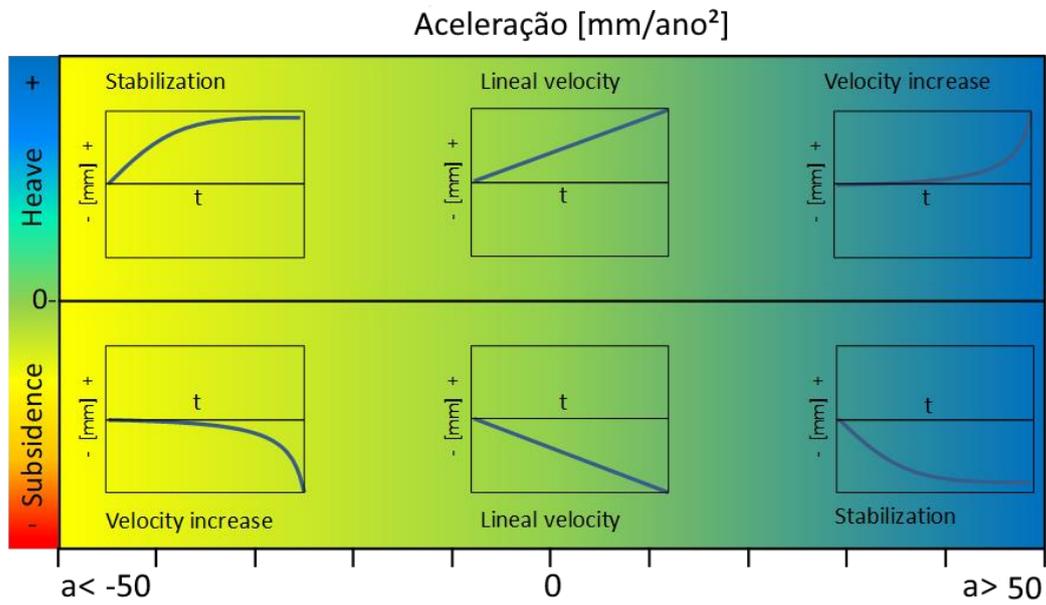


Ilustração 3: Sinal da aceleração e significado dependendo do sinal de deslocamento.

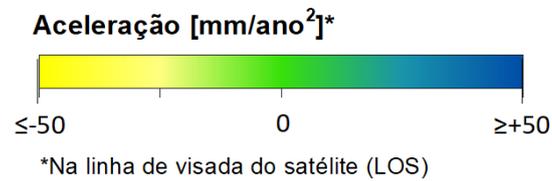


Ilustração 4: Escala de cor e variação utilizados para representar a aceleração obtida nos resultados SqueeSAR®.

## Apêndice C – Descrições Técnicas

As aquisições na geometria ascendente e descendente são determinadas pela direção de voo do satélite: ascendente, de Sul para Norte, e descendente, de Norte para Sul (Ilustração 5). As imagens são adquiridas na linha de visada do satélite (*Line of Sight* - LOS), na direção entre sensor radar e o alvo (no terreno). O ângulo da LOS em relação ao terreno [ângulo de incidência ( $\Theta$ )] varia dependendo do satélite e dos parâmetros de aquisição. Para este estudo, o ângulo ( $\Theta$ ) foi:

- configuração ascendente  $\Theta = \sim 28,40^\circ$
- configuração descendente  $\Theta = \sim 29,51^\circ$

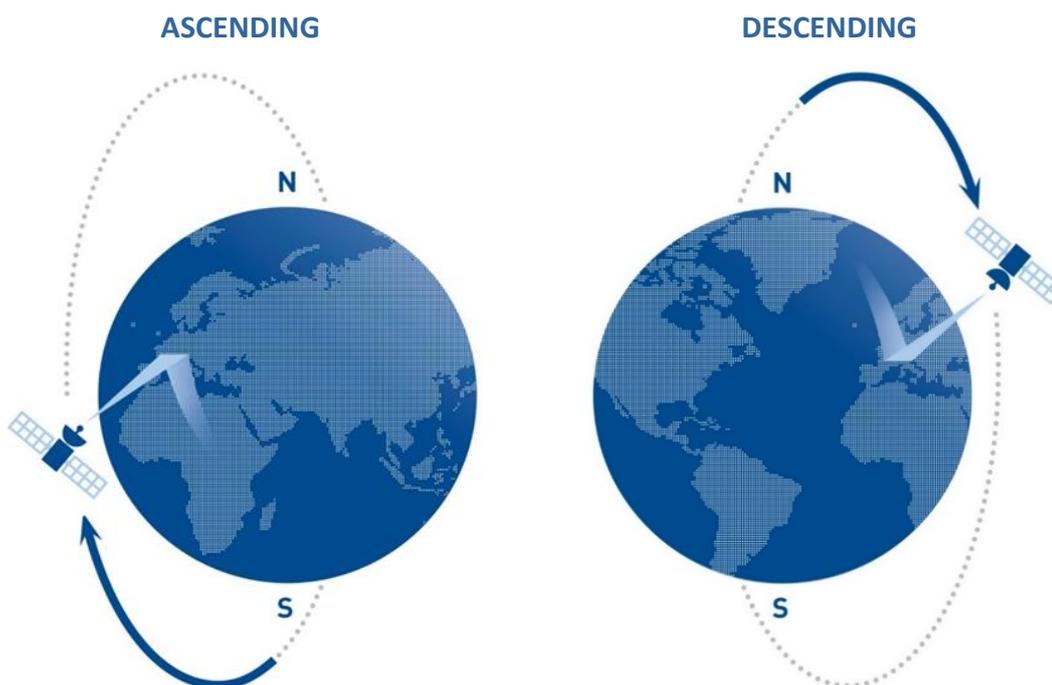


Ilustração 5: Órbitas Ascendente e Descendente dos satélites SAR, seguindo órbitas quase-polares.

A Ilustração 6 e Ilustração 7 mostram as geometrias ascendente e descendente de aquisição da imagem.

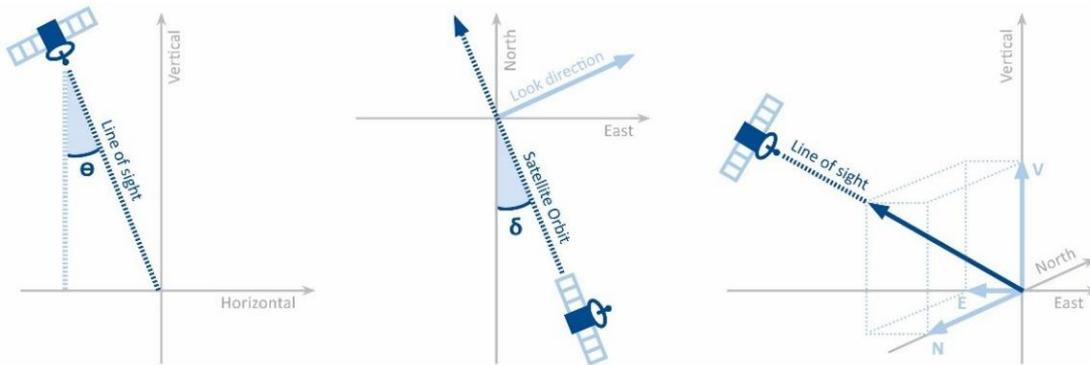


Ilustração 6: Geometria de aquisição das imagens em geometria ascendente.

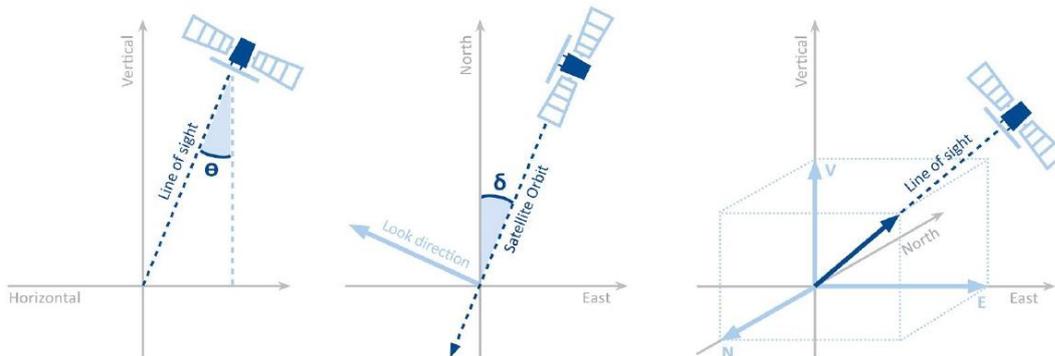


Ilustração 7: Geometria de aquisição das imagens em geometria descendente.

Nas análises InSAR, as leituras do satélite são produzidas na linha de visada do satélite (LOS), sendo a medição tomada pelo satélite uma projeção do movimento na direção LOS do vetor real de deslocamento. Isto implica que a mesma deformação vai produzir diferentes leituras a partir de diferentes ângulos e geometrias.

A velocidade de deslocamento na LOS é calculada a partir da regressão linear do movimento medido ao longo do período completo de cobertura das imagens de satélite. Cada ponto de medição corresponde a um ponto (alvo) permanente (PS) ou ponto distribuído (DS), representado em uma escala de cor, conforme a taxa de deformação média anual medida e a direção

(aproximação e afastamento do satélite). A Ilustração 8 mostra a geometria de aquisição na linha de visada do satélite (LOS) em voos ascendente e descendente, respectivamente. Na mesma ilustração, observa-se a projeção do movimento real em movimento LOS detectado pelo radar e processado para este estudo através da metodologia SqueeSAR®.

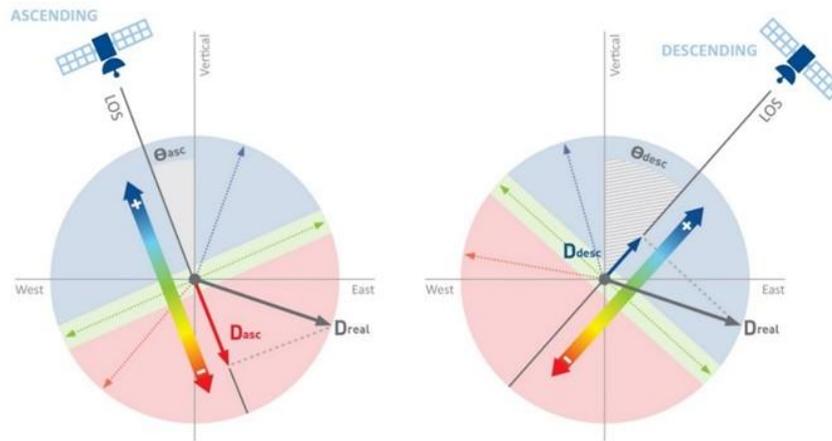


Ilustração 8: Geometria de aquisição e sensibilidade das órbitas ascendente (esquerda) e descendente (direita) mediante um recalque com componente na direção Leste ( $D_{real}$ ).

As imagens ascendentes e descendentes são processadas separadamente, porém os resultados são combinados para estimar o Movimento 2D, o qual permite separar os componentes de movimento Vertical e Horizontal (Leste-Oeste).

A Ilustração 9 mostra um modelo teórico de um deslocamento com componente horizontal na direção Leste. A imagem mostra as medições obtidas nos dois modos de observação: ascendente (o movimento é de afastamento em relação ao satélite) e descendente (o movimento é de aproximação em relação ao satélite), e sua decomposição vetorial nos componentes vertical ( $D_v$ ) e Leste-Oeste ( $D_{EW}$ ).

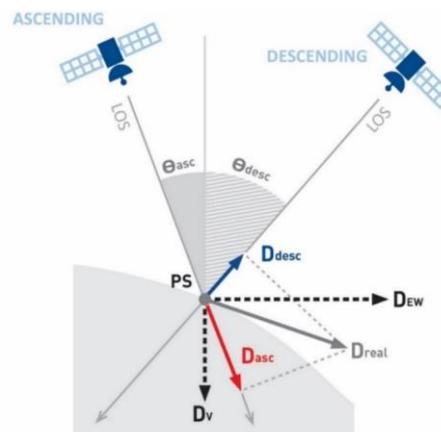


Ilustração 9: Decomposição do movimento LOS medido na órbita ascendente ( $D_{asc}$ ) e órbita descendente ( $D_{desc}$ ) em Deslocamento Vertical ( $D_v$ ) e Deslocamento Leste-Oeste ( $D_{EW}$ ).

In accordance with the provisions in article 5 of Spanish Statutory law 15/1999, of the 13th of December, Protection of Data of a Personal Nature (LOPD) and Royal Decree 1720/2007, of the 21st December, we inform the user that all personal data voluntarily provided at any time to our company or our employees, will be included in an automated data file created and maintained under the responsibility of TRE ALTAMIRA S.L. This personal data will be treated with confidentiality and will be used for the exclusive purpose of managing our client relations and transmitting information regarding our products and services. Furthermore, we wish to inform the user that personal data may be yielded to a third party for the purpose of company accounting or transportation of products. Personal data may be yielded to our branch offices in France for client management purposes. The aforementioned use of personal data meets the guidelines set out by the LOPD.

The user may, at any time, exercise his or her right to rectification, access, cancellation and opposition, by communicating in writing his or her full name and address. To: [info.spain@tre-altamira.com](mailto:info.spain@tre-altamira.com) or to TRE ALTAMIRA S.L., Còrsega, 381-387, 08037, Barcelona. All requests will be treated promptly and appropriately.





**TRE  
ALTAMIRA**  
A CLS Group Company

**TRE ALTAMIRA s.r.l.**  
Ripa di Porta Ticinese, 79  
20143 Milan Italy  
Tel: +39 02 4343 121

**TRE ALTAMIRA S.L.U.**  
Carrer de Còrsega, 381-387  
08037 Barcelona Spain  
Tel.: +34 93 183 57 50

**TRE ALTAMIRA Inc.**  
Suite 410, 475 West Georgia Street  
Vancouver, BC V6B 4M9 Canada  
Tel: +1 604 331 2512

**[tre-altamira.com](http://tre-altamira.com)**

